

18歳からの物理
加速膨張宇宙

小松英一郎

第1の難問：
加速膨張をどう説明するか

宇宙は膨張している。これは観測的事実だ。現在の膨張速度は5%の精度で測定されており¹⁾、その加速度も測定されている。それによると、加速度は正、つまり現在の宇宙は加速膨張している^{2), 3)}。宇宙膨張は時間とともに速くなっているのだ。

そしてこれが、宇宙論のみならず、現代物理学最大の難問の1つといわれている。なぜだろう？ たんに膨張速度が速くなっているだけではないか。何がそんなに大変だというのだろうか？

この記事の目的は、「宇宙の加速膨張」がいかに不思議な現象であり、加速膨張を引き起こしている源の解明がいかに難しいかを直感的に感じ、理解してもらうことにある。最後に、この問題に関する筆者の個人的な見解を述べる。

さて、宇宙には何が詰まっているかご存知だろうか。夜空にはたくさんの星が見えるが、これらは私たちの住む銀河系内の星々だ。そして宇宙には、私たちの銀河系以外にもたくさんの銀河が存在している。なので、宇宙には少なくとも銀河がたくさん詰まっている。銀河と銀河の間は望遠鏡で見ても真っ暗だが、銀河やクエーサーなどの天体のスペクトルを観測すると、それらの天体と私たちの間に存在するガスのかたまり(ガス雲)による光の吸収が見られる。したがって、銀河間はガスに満ちていることもわかっている。このガスは大部分が水素からできており、その組成は水素76%、ヘリウム24%、リチウムよりも原子番号の大きい元素はごくわずかしかな含まれない。

さらなる観測的事実として、宇宙には私たちの知っている物質以外にも多くの物質が存在する事がわかっている。最新のデータによれば⁴⁾、宇宙の全物質質量の84%程度は光を発することも吸収することもなく「暗黒物質」で占められており、水素やヘリウムなど既知の物質は全物質質量の16%を占めるにすぎない。この暗黒物質の正体は現在も不明であり、それ自身非常に重要な研究対象である。しかし加速膨張はそれ以上に難解な問題であるから、暗黒物質の問題はまたの機会に譲ることとして、この記事ではこれ以上立ち入らないことにする。

ようするに、宇宙には多くの物質が詰まっている。そこで仮に、「宇宙には物質しか存在しない」と仮定してみよう。すると、「物質のみが詰まっている宇宙では、膨張速度はどのように変化するか?」ということが問題となる。

答は減速膨張だ。加速膨張ではない。なぜなら、万有引力によって物質どうしは引き合うからだ。そして、アインシュタイン(Albert Einstein)の重力理論(一般相対性理論)によれば、空間もまた物質によって引きつけられる。宇宙膨張は、宇宙がそれ自身に含んでいる物質の及ぼす重力によって減速させられるのだ。

万有引力に関するニュートン(Sir Issac Newton)の法則を思い出そう。質量がそれぞれ m と M である2体間に働く力 F は、重力定数を G として $F = ma = -GmM/r^2$ と書ける。ここでももちろん、 r は2体間の距離、 a は加速度だ。両辺を m で割れば、加速度として

$$a = -\frac{GM}{r^2} \quad (1)$$

を得る。重要なのは右辺の符号が負、つまり、2体間に働く重力がつねに引力であるということだ。理屈としては、地上からボールを投げ上げると速度がだんだん遅くなり、最終的には落下してくるのと同じだ。

しかし、観測事実として宇宙は加速膨張しているのだから、上記の議論には何か欠けているはずだ。宇宙には、物質以外にも何か存在しているのだろうか？ たとえば光はどうだろう。光は物質ではないし、質量もない。上記の式(1)は、速度が光速よりずっと小さい粒子の運動にしか使えず、光の寄与を扱うには相対論が必要となる。後にもう少しくわしく述べるが、光の寄与もやはり減速であり、加速を生み出せないことが示せる。また、暗黒物質は正体不明ではあるが、物質であることに変わりはない。よって、暗黒物質も加速膨張を生み出せない。物質でも光でもないとなれば、いったい何が加速を担っているというのだろうか？ これが第1の難問なのだ。

期待されても困るので先に述べておくが、「いったい何が加速を担っているというのだろうか?」という質問に対する答はまだない。したがって、これからは「加速を担うことのできるもの可能性」について述べることにする。

万有引力の法則の式(1)に立ち戻ろう。これはニュートンが導いた式であるが、ニュートンの1687年の著作『プリンキピア』では、距離の2乗に反比例する力のほかに、距離に比例する力が記述されている。端的に書けば $F = ma = -GmM/r^2 + Bmr$ だ。再び両辺を m で割れば、加速度として

$$a = -\frac{GM}{r^2} + Br \quad (2)$$

を得る。 B は任意の未定数で正の値も負の値もとりのが、ニュートンは引力に興味があったため B を負とした。さて、なぜ距離に比例する力が特別かという点、ニュートンが調べた結果、距離の2乗に反比例する引力と、距離に比例する引力のみが、以下の2つの特殊な性質を満たすことがわかったからなのだ(『プリンキピア』命題77および78)。

- ・これらの力を受けて運動する粒子の軌道は、円錐曲線とよばれる軌道を描く(軌道の形が円錐の断面、すなわち円、楕円、放物線、双曲線のどれかをとり)。距離の2乗に反比例する力を受けて運動する粒子は、すべての円錐曲線を描き、距離に比例する力を受けて運動する粒子は円軌道もしくは楕円軌道を描く。
- ・球体が及ぼす力は、その球体の質量すべてを球体の中心に集中させた質点が及ぼす力に等しい。

しかし、ニュートン自身が『プリンキピア』のなかで示しているように、惑星の運動に関する観測データは距離の2乗に反比例する力によって説明できるから、これ以上とりたてて距離に比例する力を考える必要性はなかった。

しかしいまや、宇宙の加速膨張の発見により、この力の存在と重要性を再考するべきときがきたのかもしれない。まず、ニュートン自身は距離に比例する力を、引力として扱っていた。それはすなわち、 B を負とすることにしている。しかし、もし B が正だったらどうなるか？ その場合、式(2)の第2項は正となり、加速を生み出すこと

ができるようになる。もし第2項が第1項に打ち勝てば、たしかに2つの質点間(あるいは2つの銀河間)の距離は加速度的に離れてゆくこととなる。

また、距離に比例する力は、距離の大きなところのみで重要になるはずだから、惑星の運動の観測から距離に比例する力が見つからない理由は、惑星の距離程度では式(2)の第1項が第2項より大きいからだ、と推測できる(もし第2項の寄与が地球上でも重要ななら、日常生活は一変してしまうだろう。地上からボールを投げ上げて、第1項目が重要となる距離までしか届かなかったとすればボールは地上に落下してくるが、第2項目が重要になる距離まで投げ上げれば、ボールはそのまま加速度的に速度を増し、落ちてくることはない!)

上で述べたように、距離の2乗に反比例する引力と距離に比例する引力は、2つの特殊な性質(円錐曲線軌道、および球体と質点の及ぼす力の等価性)を共有するという意味において対等である。つまり、その物理的性質だけに着目すれば、片方が自然界に存在するならば、もう片方が存在しても不思議ではない。実際、距離に比例する力は、まったく異なる形で身近に存在する。ばねだ。ばねの及ぼす力はフックの法則に従い、 $F = -kr$ で与えられる。 r はばねが自然長から伸びた(縮んだ)長さ、 k はばね定数だ。この場合も、自然長から伸びた(縮んだ)ばねは自然長に向かって引力を受ける。

このように、距離に比例する力がすでに身近に存在するのなら、もししたら私たちが気づいていないだけで、重力にもそのような性質があるのかもしれない。そして、もし加速膨張の発

見がこの力の存在を示唆するならば、やはり重力には距離の2乗に反比例する力と距離に比例する力が両方あったことになる。ただし、前者は引力で後者は斥力でなくてはならないのだが。

では、ニュートンが考えたこのもう1つの力は、加速膨張の説明になりうるのか？ この力を足すことによって観測事実である加速膨張を再現できるという意味では、たしかに説明になっている。しかしそれだけでは、私たちがこの効果を理解できたことにはならない。

第2の難問：
宇宙定数とは何か

この問題をさらに深く掘り下げるには、ニュートン力学の枠組みを出なくてはならない。これまでは、加速膨張の不思議さと説明の困難さを感じてもらうために、あえてニュートン力学を用いて議論を進めてきたが、宇宙を記述するにはニュートン力学では不十分で、アインシュタインが1916年に発表した一般相対性理論を用いる必要があるのだ。

ニュートン力学は、力が作用したときの粒子の運動を記述できるが、宇宙膨張は空間の膨張である。ニュートン力学は静的な空間中の粒子の運動を記述する理論だから、空間の動きは記述できない。一般相対性理論によれば、物質のみを含む宇宙の空間膨張による2つの質点間の距離(2つの銀河間の距離) r の変化は、以下の加速度をもつ。

$$a = -\frac{4\pi G\rho r}{3} \quad (3)$$

ここで ρ (ギリシャ文字で“ロー”と読む)は、宇宙に存在する物質の質量密

度だ。一般相対論においても、「質量 M をもつ球体が及ぼす力は、その質量すべてが球体の中心に集中した質点が及ぼす力に等しい」という性質が成り立つことがわかっている。2つの質点のうち、片方を半径 r をもつ球体として扱おう。すると、その球体のもつ質量は、質量密度 ρ かける球体の体積 $(4\pi/3)r^3$ で与えられるから $M = (4\pi/3)\rho r^3$ で、すなわち

$$a = -\frac{GM}{r^2}$$

を得る。これは一般相対論を用いて導いた結果だが、ニュートン力学を用いて導いた式(1)と形式的に同じだ。これが、最初にまずなじみの深いニュートン力学を用いて議論を進めた理由だ。

さて、相対論を用いれば、光の寄与も含めることができる。光子が及ぼす加速度は

$$a = -\frac{4\pi G(\rho + 3P)r}{3} \quad (4)$$

で、 ρ は光子のもつエネルギー密度、 P は光子のもつ圧力だ。光子の圧力は正の値をとるから、光子の寄与もやはり減速膨張であることがわかる。実際、光子の圧力は $P = \rho/3$ で与えられるので $a = -8\pi G\rho r/3$ が得られ、加速度は負、すなわち減速膨張だ。同じ大きさの密度 ρ をもつ物質と光子を比べると、光子による減速度は物質による減速度の2倍であることがわかる。物質の圧力は密度に比べて無視できるほど小さいが、光子の圧力は密度の1/3で、圧力と密度の大きさが同程度となる。この正の圧力が、膨張をより減速させるのだ。

逆にいえば、もし負の圧力があれば、

加速膨張を引き起こすことができる。この可能性については後に述べる。

圧力の無視できる物質の場合に戻ろう。アインシュタインは、彼が構築した一般相対性理論の枠組みのなかでは、加速度に距離に比例する項を足しても一般相対性理論の基礎となる一般相対性原理(物理法則は座標系のとり方によらず不変)と矛盾しないことを見いだした。その寄与を加えれば、

$$a = -\frac{4\pi G\rho r}{3} + \frac{\Lambda}{3}r \quad (5)$$

で、 Λ (ギリシャ文字で“ラムダ”と読む)は“宇宙定数”とよばれる未定の定数だ(係数の1/3は慣例的なもので、重要ではない)。 Λ は正の値も負の値もとりうる。これを、ニュートンの考察から導かれた式(2)と比較すれば、(再び $M = (4\pi/3)\rho r^3$ を用いて ρ を M で書き換えれば) $\Lambda = 3B$ とおくことで両者が等しくなることがわかる。したがって、上でニュートン力学を用いて展開した加速膨張の議論を、そっくりそのまま一般相対論的宇宙論に適用できる。 Λ が正であれば、加速膨張を引き起こすことができるのだ!

ところで、アインシュタインが Λ を導入した理由は、加速膨張とは関係ない。彼は、宇宙は静的であって膨張も収縮もしていないと信じていたが、彼の方程式(3)は、物質が存在すれば宇宙は静的ではいられないことを予言した。したがって、宇宙膨張を打ち消すように $\Lambda = 4\pi G\rho$ を導入したのだ。式(5)をみれば、 $\Lambda = 4\pi G\rho$ に対して $a = 0$ であることがわかる。

では、宇宙定数 Λ は加速膨張の説明になりうるのか? 一般相対性理論の枠組みのなかでは、宇宙定数が存在し

てはならない理由はない。したがって、もし宇宙定数の値がゼロであるならば、なぜゼロであるか説明せねばならない。もし加速膨張の発見が宇宙定数の存在を示唆するならば、宇宙定数がゼロである説明はいらないわけだから、それはそれでよいことなのかもしれない。

しかし、宇宙定数で加速膨張が説明できたとしても、私たちがこの効果を理解できたことにはならない。宇宙定数とはいったいぜんたい何なのか? この疑問に答えられないうちは、何も理解したことにならないのだ。これが第2の難問である。

そもそも、宇宙定数は「一般相対論がその存在を許す」という理由で式(5)に存在しているのであって、その値は観測から求める以外に決めようがないし、その起源もわからない。「一般相対論がその存在を許す」という理由で式(5)に存在している宇宙定数が、実際に自然界に存在しているというのはたいへん興味深いのだが、自然界に存在する以上、私たちはその起源や物理的意味を理解せねばなるまい。現在宇宙が加速しているということは、宇宙定数の寄与が物質や光の寄与を上回っているということで、それはすなわち宇宙の全エネルギーの大部分は宇宙定数によって占められているということである。私たちの住む宇宙にとってそんなに重要な役割を果たす宇宙定数を、素性もわからぬまま存在だけ受け入れるというのは、難しい注文なのだ。

後に述べるが、現在の観測からは10%程度の精度で加速膨張の源が宇宙定数、あるいは宇宙定数のようなもので担われている、という示唆が得ら

れている⁴⁾。つまり、宇宙には何かしらの定数——時間的にも空間的にも変化しない何か——が存在していて、それが物質や光に打ち勝って宇宙のエネルギーの大部分を占め、通常では考えられない加速膨張を生み出しているらしい。

最先端の観測データに基づく現在の宇宙観により、私たちはちょっと普通では想像できない領域に足を踏み込みつつあるのだ。宇宙定数とは、いったい何なの?

ここで、宇宙定数を少し違った視点から見てみよう。宇宙定数が奇妙なのは、とにかくそれが定数であるからだ。その値は、どの時間で測定しても、どの場所で測定しても、つねに一定なのである。再び物質を見てみよう。宇宙は膨張しているのだから、ある体積中に存在する物質量はどんどん薄まってゆくはずだ。つまり、物質密度 ρ は宇宙膨張とともに減少するはずである。実際、宇宙が R 倍だけ膨張すれば(銀河間の距離が R 倍になれば)、物質密度は $1/R^3$ 倍になる。しかし、宇宙定数は宇宙膨張にかかわらず一定なのだ。これがいかに奇妙であるかを理解するため、議論をより一般化して圧力も含めてみよう。熱力学第1法則(エネルギー保存則)より、外部と熱のやりとりのない系では

$$\begin{aligned} & \text{(内部エネルギーの変化率)} \\ & + \text{(圧力のなす仕事率)} = 0 \end{aligned}$$

である。エネルギー密度 ρ 、圧力 P 、および体積 V を用いて書けば、

$$\begin{aligned} & \text{(内部エネルギーの変化率)} \\ & = d(\rho V)/dt, \\ & \text{(圧力のなす仕事率)} = PdV/dt \end{aligned}$$

である(d/dt は時間微分を表す)。したがって、密度 ρ の変化率は圧力にも影響されることが導ける。

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} (\rho + P) = 0 \quad (6)$$

さて、物質を考える場合、圧力は密度に比べて無視できる。すると式(6)の解として $\rho = A/V$ (A は任意の積分定数) が得られる。宇宙が R 倍だけ膨張すれば体積 V は R^3 倍になるのだから、宇宙が R 倍だけ膨張すれば、物質密度は $1/R^3$ 倍になる。光子はどうか? 光子の圧力は密度の1/3倍、つまり $P = \rho/3$ だから、式(6)の解として $\rho = A/V^{4/3}$ が得られる。つまり、宇宙が R 倍だけ膨張すれば、光子のエネルギー密度は $1/R^4$ 倍になるのだ。

それでは、宇宙が膨張しても密度が一定であるようなエネルギー成分は、(少なくとも理論上は)存在するのだろうか? 式(6)をよく見てみよう。 ρ が一定であるということは、その時間微分はゼロ、つまり $d\rho/dt = 0$ だ。宇宙は膨張しているのだから、体積の時間変化率 dV/dt はゼロではない。したがって、 $d\rho/dt = 0$ を得るには $\rho + P = 0$ が要求される。つまり、絶対値がエネルギー密度に等しい負の圧力 $P = -\rho$ をもつような成分があれば、 $d\rho/dt = 0$ が得られるのだ。

負の圧力! すでにみたように、物質も光子も、そんな奇妙な性質はもち合わせていない。

加速膨張を担っているのは、本当に宇宙定数なのだろうか? 宇宙定数を何らかのエネルギー成分とみなしたければ、その圧力は必ず $P = -\rho$ を満たさねばならない。最新の観測では、加速膨張を起こしている成分のエネル

ギー密度と圧力の関係式として

$$P = (-1.01 \pm 0.07)\rho$$

が得られている⁴⁾。したがって、7%の不定性の範囲内で、確かに宇宙定数の存在が示唆されているようにみえる。

宇宙定数から暗黒エネルギーへ: そして第3の難問

しかし、まだ7%の観測的な不定性があるのだから、加速膨張が宇宙定数によって担われていると完全に証明されたわけではない。圧力と密度の関係が $P = -\rho$ からずれば ρ は時間変化するのだから、定数ではなくなるのだ。

とにかく現在わかっているのは、圧力が負で、 $P = -\rho$ を近似的に満たしているような未知のエネルギー成分によって加速膨張が起こっている可能性がある、ということなのだ。それは宇宙定数かもしれないし、そうでないかもしれない。このような、時間変動する可能性も含めた未知のエネルギー成分のことを総称して“暗黒エネルギー”とよんでいる。宇宙定数は暗黒エネルギーの特殊なケース(時間変動も空間変動もしない定数)として扱われる。

ともかく、以上のような議論を用いれば、宇宙定数などというミステリアスなものを、エネルギーと圧力といった、よりなじみの深い量に関係づけることができるし、暗黒エネルギーの性質(圧力と密度の関係式)を観測的に検証することもできる。

それでは、時間に関して一定で、負の圧力 $P = -\rho$ をもつようなエネルギー成分として、何か考えられるものはあるのだろうか?

1933年、ビッグバンの父とよばれる

ベルギー出身のルメートル (Georges Lemaitre) は、宇宙膨張に対する宇宙定数の効果が“真空のエネルギー”の効果と等価であることを指摘した⁵⁾。真空とは粒子の存在しない状態をいうわけであるから、それがエネルギーをもつというのは矛盾だと思うかもしれない。しかし、現代物理における真空の描像はだいぶ異なる。誌面の都合でくわしく解説できないのが残念だが、真空状態では、粒子と反粒子の対 (たとえば電子と陽電子の対) がつねに現れては消えているのである。それはすなわち、真空がエネルギーをもつことを意味する (端的にいえば、粒子と反粒子対は真空からエネルギーを借りて生成され、真空に戻るさいに借りたエネルギーを戻すのだ)。もう少しきちんといえば、現代物理では真空状態は“粒子のない状態”というよりも、“系のとりうる最低のエネルギー状態”と解釈する。ここでいう“系”とは、私たちの宇宙のことだ。最低のエネルギー状態がエネルギーゼロであるならば、真空のエネルギーもゼロである。そして、最低のエネルギー状態が一定であれば、真空に付随する ρ も一定、それはすなわち宇宙定数のように $P = -\rho$ を満たすことを意味する。最低のエネルギー状態が宇宙膨張とともに変化すれば、それは時間変動する暗黒エネルギーとして解釈できるだろう。

そして、ここで決定的な大問題がもち上がる。私たちが知りうる物理の知識を用いると、どれだけ控えめに見積もっても、理論的に期待される真空のエネルギーが、加速膨張の観測から得られる値よりも50桁以上大きくなってしまふのだ!^{6), 7)} それはすなわち、真空のエネルギーはたしかに加速膨張

を起こせるのだが、加速膨張を破滅的に起こしすぎてしまうことを意味している。私たちは真空のエネルギーが実際に存在していると考えているのに、宇宙はそうではないといっているように思えるのだ。

なかには、次のような見方をする人もいる⁷⁾。自然界には真空のエネルギーと宇宙定数が両方存在しており、その2つの寄与がほとんど相殺する、すなわち

$$\rho_{\text{真空}} + \rho_{\Lambda} \approx 10^{-50} \rho_{\text{真空}}$$

が満たされている、というのだ。真空のエネルギーの寄与 $\rho_{\text{真空}}$ は正だが、宇宙定数の寄与 ρ_{Λ} は正も負もとれるので、ここでは ρ_{Λ} は負である。小数点以下50桁にわたる相殺は異常であり、そんなことが起こる確率はおそらく低いはずだが、相殺が起こらなければ、大きすぎる真空のエネルギーのために宇宙の膨張速度が速くなりすぎ、宇宙には銀河が形成されず、私たちも存在しないことになってしまう。したがってこのような見方に立てば、私たちが存在し、加速膨張を観測できる宇宙は、上記の相殺が起こった宇宙のみである、という結論に達する。このような、自然界の現象を「自然界がある状態をとっているのは、そうでなければ私たちが存在しないからだ」という論理で説明しようとする考え方は、“人間原理”として知られている。

しかし、筆者の考え方は異なる。筆者は、1916年のアインシュタインの一般相対性理論をそのままあてはめた宇宙理論では、この現象は説明できないと考えている。理由は以下のとおりだ。

宇宙定数や、時間変動しない真空の

エネルギーというのは、時間と空間にわたって一定なのである。そのようなものは、物理的実体とみなしてよいのだろうか? 百歩譲ってたとえそのようなものがあつたとしても、それは観測可能なのだろうか? 完全に一定なものは、観測量に影響を与えべきなのだろうか? 空間にエネルギーが満ち満ちていたとしても、あらゆる点で同じエネルギーをもっており、さらにそれがまったく時間変化しないのであれば、いったい私たちはどうやってそのエネルギーの存在を知りうるのだろうか。どんな測定も、そのような一様なエネルギーの存在を検出できないはずなのだ。ただ唯一、アインシュタインの一般相対性理論に基づく宇宙理論だけが、そのような一様成分が宇宙の加速膨張を導くと予言している。しかし、予言される真空のエネルギーの値は、観測されている加速膨張を説明するには50桁以上大きすぎる。これほど観測と整合しない説明は、すでに棄却されたと考えるべきだ。

筆者の見解では、真空のエネルギーは存在する (あるいは存在してもかまわない) し、宇宙定数さえも存在する (存在してもかまわない)。ただし、上記のような小数点50桁以上にわたる相殺は必要としない。代わりに、以下のように考える——「時間に関しても空間に関しても一定なエネルギーは、物理に影響を与えない」。考えてもみてほしい。宇宙膨張以外のすべての物理現象は、真空のエネルギーの存在に影響されないのだ (カシミール (Hendrik Casimir) の提唱した“カシミール効果”とよばれる効果の観測が真空のエネルギーの存在を証明したといわれることがあるが、カシミール効

果の説明に真空のエネルギーは必須ではない。それはカシミール自身、およびシュウィンガー (Julian Schwinger) によって示されている⁸⁾。宇宙膨張だけが真空のエネルギーや宇宙定数に影響されるが、観測データはそのような解釈が誤っている、と私たちに教えてくれている。少なくとも筆者はそう観測データを解釈するし、人間原理が必要だとも思わない。

加速膨張宇宙はおそらく私たちに、アインシュタインの一般相対性理論に基づく宇宙理論は修正されねばならないことを教えているのだろう。筆者は、宇宙膨張を記述する真の理論は、時間と空間に関して一定なエネルギーの影響がいっさい排除された形に書かれているべきだと考える (同じような立場に立って構築された理論にパドマナバン (T. Padmanabhan) の“発重力” (emergent gravity) 論⁹⁾があるが、この理論では宇宙膨張の式に未定の宇宙定数が積分定数として現れてしまうので、満足できない)。そのような理論は必然的に、暗黒エネルギーは一定ではありえない、つまり $P = -\rho$ ではありえないことを予言する。しかしこれだけでは、圧力と密度の関係が $P = -\rho$ からどのくらいずれるか予言することはできない。1%くらい (たとえば $P = -0.99\rho$) であれば将来的に測定可能かもしれないが、0.1%程度のずれであれば測定は難しいだろう。

審判は、さらなる観測によってのみ下される。暗黒エネルギーは一定なのか否か? この間に答が出たとき、私たちは、宇宙を支配するエネルギーに関してより多くを知ることになるだろう。あるいはさらなる謎をつきつけられて、途方に暮れてしまうかもしれない。

参考文献

- 1) A. G. Riess *et al.*: *Astrophys. J.* **699**, 539 (2009).
- 2) A. G. Riess *et al.*: *Astron. J.* **116**, 1009 (1998).
- 3) S. Perlmutter *et al.*: *Astrophys. J.* **517**, 565 (1999).
- 4) E. Komatsu *et al.*: *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **180**, 330 (2009).
- 5) G. Lemaitre: *Proc. of the National Academy of Sciences* **20**, 12 (1934).
- 6) Ya. B. Zel'dovich: *Soviet Physics Uspekhi* **11**, 381 (1968).
- 7) S. Weinberg: *Rev. Modern Phys.* **61**, 1 (1989).
- 8) S. K. Lamoreaux: *Physics Today* **60**, 40 (2007).
- 9) T. Padmanabhan: *General Relativity and Gravitation* **40**, 2, 529 (2008).

具体的にわかりやすく
天文学の深い理解へ

天文学入門

星とは何か

中嶋 浩一 著
A5判・196頁

定価2,625円(税込)
ISBN978-4-621-08116-7



目次
星の観察や星の一生を中心に、天文学の標準的内容を初學者向けにわかりやすく解説。たとえば、理科年表の数値を用いた具体的な解説など、理解を深める工夫がなされている。

現代天文学と星座／恒星の世界／恒星界の多様性／恒星界の規則性／非恒星状天体のリスト、メシエカタログ／星とは何か——恒星の内部構造理論／星の一生 (I) 星の誕生と成長の理論／星の一生 (II) 星の最期

M MARUZEN

丸善 (出版事業部) 営業部 TEL (03) 6367-6038
http://pub.maruzen.co.jp/