

宇宙は膨張しているか？

ジャン・クロード・ペケール*

現在においても、コペルニクスとかジョルダノ・ブルーノの時代においても、「宇宙」について話すのは難しいものです。宇宙とは存在するもの全てである、と定義されます。存在するものとは観測されたもの、まだ観測されないもの、観測できるもの、観測できないもの、そして絶対に観測不可能なものを含みます。

宇宙の中の観測された部分が天文学の領域です。宇宙を全体として見たものが宇宙論の考察の対象になります。

本質として宇宙論は天文学のデータを宇宙へと外挿しようとします。この外挿は私達が持っている知識と両立するよう、道理にかなった方法で行われます。宇宙論の外挿は次の二つのことを見込んで行います。

まず、普遍的と考えられている物理法則の使用です。ニュートンの物理法則にはニュートンの宇宙論が対応していました。アインスタインの物理法則にはもちろんのことながら相対論的宇宙論が対応します。この宇宙論の任意常数、それは実際に沢山あるのですが、の選択によって宇宙を記述するためのモデルを無限の数だけつくることができます。そしてどのモデルもアインスタインの相対論の物理法則と両立します。……私達は今日、無限個の宇宙論から選べるのです。……しかし、系統的な研究が私の講演の目的ではありません。このことについては御諒承頂きたいと思います。

どのような宇宙論をつくるのにも次に考慮すること、境界条件を満足して、その宇宙論学者にとって宇宙論的意味を持っている少数の観測的事実だけを考慮することです。その事実というのは、膨大な天文学上の観測の雜然たる集合の中にある普遍的統一の指紋に相当するものです。この事がつくろうとする宇宙の理論の鍵であり、またその理論のみが「宇宙論的」と呼んでいる観測を説明できるのです。ニュートンの時代にはもちろんりんごはありましたし、月、太陽、地球はその軌道上を動いていました。現在でもこれらの事実——万有引力の存在を示すもの——はあります。しかし他の事実もあります。今日の宇宙論の主な問題は意見が大変分かれていることです。つまり研究者達は宇宙論的意味を持つ観測事実を選択するにあたっていつでも一致するわけではないのです。選択というのは常に主観的なものですから……

1. ところで、約 50 年前に科学上の一つの法則が発

見され、その法則はすぐに宇宙論的事実の中でもっとも重要なものになりました。私が話そうとしているのはエド温・ハッブルによる発見のことです。ハッブルの名をつけられているこの法則は、銀河の推測距離と私達から遠ざかっているように見えるみかけの速度が厳密に比例する、と説明しています。その時以来ハッブルの法則は観測の拡大、天体物理学上の発見、宇宙を全体としてとらえる豊饒な思想をもたらしました。この大発見が持つ科学的、哲学的な重要性は明らかです。

ハッブルの法則は銀河系に関する法則です。星の集合の巨大な注目すべき天体については、もう少し後で説明しましょう。今ここでは「銀河系は宇宙を構成している要素である」ということがわかつていれば充分です。銀河系の研究が本格的に始ったのは 19 世紀になってからで、しかもその進歩は初めの中はとてもゆっくりとしていました。

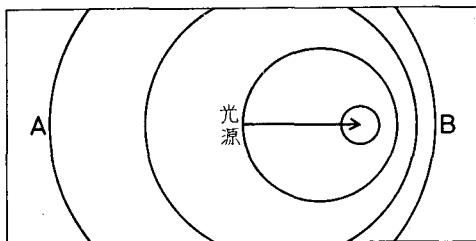
基本的な問題は銀河系の距離を決定することでした。人々は、自分自身が巨大な星の家族に属していることを知っていました。天球上にあるその証拠は天の川です。全体で私達の銀河系となるもの一部分の断面が天の川です。しかしその頃は他の銀河系（まだ「星雲」と呼ばれていた）は、天の川の中にあると考える人達もいました。近くにある銀河系の距離をはじめて科学的に決定したのはハッブルです。ウィルソン山の 100 インチ望遠鏡の使用開始と関連する、この英雄的な時代のことを簡単に説明しましょう。

私達から何百万光年の距離にある何百万の銀河系を精密に測定した結論は、これは疑いの余地のないですが、「測定できる限りでは宇宙は膨張しているように見える」というものです。実際、どの銀河系も私達の銀河系から、距離が遠ければそれだけ速度も大きくなる、というような速度で離れていくように見えます。これがハッブルの法則です。 G_i という銀河系が私達から L_i という距離にあれば、 V_i という見かけの速度で遠ざかるように見えます。 V_i は距離が大きい程大きく、 H をハッブル定数とすれば $V_i = HL_i$ とかけます。

速度は光のドップラー・フィズー効果によって測られます。光源（波の源）が動くと、波の振動数は一定なので、B という観測者の方に動いているとすれば、B という観測者に到着する波はつまりこれがわかります。だから、近づいてくる銀河系を観測すると、波長は普通より短くなり、遠ざかっていく銀河系を観測する

* コレージュ・ド・フランス教授

Jean-Claude Pecker



と、波長は理論的なものより長くなります。いいかえれば、スペクトル全体について $\Delta\lambda/\lambda_0$ という変位を観測することになります。観測者 A にとっては、どのスペクトルでも理論的な波長よりも長くなります。

例として銀河系のスペクトルを考えましょう。この銀河系のスペクトルは光のエネルギーの分布を示しています。波長領域全体にわたる連続スペクトルがあり、この連続スペクトルのある特別な場所にスペクトル線が見られます。このスペクトル線は光源に含まれている元素に特有なものです。スペクトル線の有名なものとしては、例えば、電離カルシウムの H 線、K 線があります。この電離カルシウムのスペクトル線は逃げて行く銀河系の変位、つまり「速度」を測定するのに長いこと使われてきました。変位 $\Delta\lambda$ は測定された波長と理論的な波長 λ_0 の差で、この変位が遠ざかる速度 V_i を決めます。 $\Delta\lambda/\lambda_0 = V_i/c_0$ 実際にはもう少し複雑になります。地球上に観測者がいて、また銀河系は私達から遠ざかっているだけではなく、お互い同志も、その間の距離が大きければ大きい程、大きな速度で遠ざかっていることは明らかです、そこでコペルニクス的原理を認めなくてはならなくなります。私達の銀河系が宇宙の中心的役割りを果たすという理由はどこにもありません。これは宇宙のどの銀河系についても同じです。宇宙のどの銀河系から見ても他の銀河系は、遠くにあればある程大きな速度で遠ざかっています。だから、観測可能な宇宙はどこでも膨張しているように思われます。

ハッブルの法則は、だから、銀河 i の距離 L_i と速度 V_i の比例関係だ、と説明することができます。

ここで、スペクトルの変位によって測定された速度 V_i は見かけの速度であることを注意しておきましょう。ハッブル自身が膨張を余り考えていないかったことも強調しておきたいと思います。実際の速度を表わすのかどうか確信が持てなかったので、いつも彼は「見かけの速度」という言葉を使っていました。つまり、スペクトル変位がドップラー効果以外の原因に依っている可能性があるのを、その事で暗に意味していたのです。

2. 銀河系の明るさはその距離に依っているとハッブルは考えました。遠くにある程銀河系は暗くなります。これによって銀河系の距離を大ざっぱに決めることがで

きます。他にも距離を決める方法がありますが、それについてはここでは述べません。しかし、銀河系は私達の眼には特別の世界に見えます。良く似た銀河系は二つとありません。銀河系をいくつものカテゴリーについて列挙することができます。形の違う銀河系、明るさの違うもの、モルフォロジーの違うもの……とやっていくと昆虫の分類学と較べられる程度です。だから銀河系の明るさは距離を測るのには悪い物差だといえます。

銀河系の距離を推定するのは明るさを測定するよりはるかに難しいことです。このことは、膨張説を支持するため、或はそれを攻撃するための議論の基本的な点として使われました。銀河系の距離を推定する方法を知らなければなりません。そしてそれは大変難しいのです。実際どの銀河系がどの距離にあるというのをどうやって決めますか? 「ちゃんとした」ことをしようとすれば、ハッブルの法則と同じ型、同じ光度の銀河系について確立しなければならないことは明らかです。そうでなければ何をやっているのかわからない、ということになります。

この段階で素晴らしい銀河の世界の古典的な写真を眺めながら、いくつかの考え方をまとめていきましょう。銀河系の質量は私達の銀河系同様に太陽質量の約千億倍もあり、また端から端まで光で数十万年かかる程大きな天体です。しかし、質量、明るさ、大きさは大きく変わり、形も非常に多様性を示します。つまり空間の中で孤立していることはなく、星と同じように集団になって集まる傾向を持っています。私達の宇宙は私達が認識している限りでは「階層」を持っています。凝集の階層があるのです。地球のような凝集は物の凝集です。太陽は星間物質の中での凝集です。しかし銀河系の集団は少し違います。

ハッブルの法則に戻りましょう……

距離の較正に当って銀河系または銀河系の群に重みをどうつけるかによってハッブル定数が違った値になります。そしてこの値が宇宙膨張の理論という建造物の基礎になっています。二つの研究者のグループ——二つ共優秀なグループです——が実際に採用している値を出しましょう。タンマンとサンデージは $55 \pm 5 \text{ km/s/Mpc}$ (単位長さ当たりの速度、Mpc は 100 万パーセクで、300 万光年) という値を与えており、ドゥ・ボーグルールは 80 乃至 100 という値を出しています。この二つの値は両立しません。そして、世界中でも優秀な観測者によって与えられた値なのです。この理由は、彼等の選択の基準が違ったからです。較正の銀河系に同じものを選ばなかつたから、相入れない結果に到達したのです。

私は、現在の段階ではまだハッブル定数の値に確信を持つてゐるのは思いません。しかし、これは私達がいおうと思っていることに余り関係しません。「ハッブルの法則は

平均としては比較的良く確立されているといって良く、その定数 H については意見が一致していない」といえば良いでしょうか。

大きな問題はハッブルの法則が平均的にしか確立されない事です。この事にはまた後で触れます。

3. a) ハッブルの法則が発表されるとすぐに宇宙が膨張しているという考えがでてきました。ところで、一般相対論の方程式の解が記述する宇宙モデルの枠内では宇宙の半径は $R(t)$ という時間の関数で記述されます。ハッブル定数 $H_0 = \dot{R}/R$ と減速係数 $q_0 = -(\ddot{R}R/\dot{R}^2)$ がモデルを決めます。この二つが宇宙論的モデルを決めるのに必要な観測可能なパラメータです。この議論も先には進めないとしましょう。私達の目的は相対論的宇宙論の講義をすることではなくて、観測と対比して、また観測からでてくる反論による、困難な点を明らかにすることにあるからです。

さて、ところで、現在受け入れられている宇宙モデルは本質的には、ルメートル神父による、既に大変古い解(1925-1931)の結果の膨張モデルです。原初アトムと呼ばれるものからの膨張で近代の宇宙論者はビッグ・バンという名をつけています。この名は膨張が爆発的だということから来ています。

50 年代になって、新しい望遠鏡や観測装置の時代の初期ですが、科学界の意見は大多数、ためらいを伴うこともあったが、ルメートルに従って膨張する宇宙という秀れた思想を探り入れたのでした。その頃法王ピオ十二世は教皇庁アカデミーでの講演(1951), 次いで天文学者に対する講演(1952 年 8 月)で明瞭にこの見解を採用したのです。当時の天体物理学者である多くの人にとって法王は「絶対の人格」だったのです。

3. b) その頃の熱心な膨張論者はジョージ・ガモフでした。相対論的宇宙論による宇宙理論によって彼は予測を行いました。この予測は大変重要です。ガモフは 1949-1950 年頃、「初期のすさまじい光の化石が観測される筈だ」ということを示します。彼によると私達は巨大な天火の中に浸っており、その温度は 3°K または零下 270°C です。

この頃には、遠赤外で強くなるこのような光を地上から観測することはできませんでした。しかし後になって観測者は——この理論のことは無視していたのですが——ペンジアスとウィルソンが、ミリメートルの波長域において約 3°K に相当し、宇宙論的光ともいわれる黒体の電磁波、を発見しました。この光はその後いろいろな研究者によって、いろいろな方法で何度も測定されました。この輻射は実際上一定で、またほとんど等方的です。

ガモフの予見は本質的には確認されました、そして膨

張論者の理論の重みは一層ふえました。この発見によって、膨張論は観測的に重要な二つの事実によって支えられることになり、飛躍します。この発見によって観測は相対論的宇宙モデルに二つの定数、ハッブル定数 H_0 と宇宙論的温度 T_0 を提供し、理論によるモデルの二つの定数を決められるようになったのです。

3. c) もう一つの種類の観測が膨張説を強く支持するようになりました。宇宙の化学組成です。重い元素は星の中心で、良く知られている熱核反応によって作られることを私達は知っています。しかしヘリウムとかデューテリウムについてはどうでしょうか。ヘリウムの問題の一つに限りましょう。私達の銀河系の中では、どうして(元素の数で表して) 10% のヘリウムがあるのか説明できません。星の中の核反応だと 2% しか見つからない筈です。ヘリウムを誕生させられるのはアンゴロ・サクソン系の学者が「ビッグ・バン」と呼んでいる時から僅か数十秒後の宇宙膨張の初めの時期における、とても高い温度での反応です。その後のもっと低い温度の原子核反応では宇宙の元素の重いものは変りますが、ヘリウムはほとんど影響を受けません。そして理論は観測された量、 H_0 , T_0 , ヘリウム量が膨張宇宙と両立することを示しました。高温、高密度の物質が 200 億年前に急激に爆発したのです。

このビッグ・バンと現在の宇宙の膨張が、今日もっとも一般に受け入れられている宇宙についての記述を与えています。しかし、この非常に簡単な記述の中に何と沢山の難点を抱えていることでしょう。そのうちいくつかについてこれからお話ししましょう。どれをとっても、この建造物に重大な疑問を持たせる充分に深刻なものです。

4. まずクエーサーの発見があります。クエーサーとは何でしょうか。これは、天体写真上では星のように点として写っており、電波または紫外線の超過によって見分けがつきます。しかし、これの距離を直接に測ることはできません。また赤方へのスペクトル変位が大変大きく、この変位が距離の唯一の尺度になっています。そしてクエーサーはハッブル図($m-z$ 図)上で大変散らばっています。

この分散それ自体がすでに驚くべきことです。クエーサーはハッブルの法則に、少くとも簡単には、従いません。そうでなければ(10 等にもおよぶ) 大きな明るさの違いを持ってしまいます。これを一つの種類のものとして取り扱っていいものでしょうか。

クエーサーについて次に注意したいことは、銀河に似ていないということです。この天体は大変小さいのです。天球上でもっとも奇妙な天体の一つ、3C379 はその明るさとスペクトルを毎年変えています。天体がこのように

速く変光するのは何を意味するのでしょうか。何十万光年もの直径をもつ私達の銀河系が年の単位で変光することはありません。それは不可能です。私達の銀河系の中の天体は、どれをとっても他の全部を合わせたものより明るくなることはありません。だからこの種の事実を説明するために、クエーサーの大きさは何万光年ではなくて何光年のオーダーに違いないと結論しなければなりませんでした。

そういうわけでクエーサーは銀河系よりはるかに小さいのです。そして驚くべきことには、ハッブルの法則の示す距離にクエーサーを置くと、星や古典的銀河系のエネルギー源である熱核反応で説明できるエネルギー生成率よりはるかに大きなエネルギー生成をクエーサーは持っているとしなければなりません。これが私達に課せられたクエーサーによる第二の難点です。

第三の難点は、電波源の研究の進歩によってでてきました。電波天文学者は単一の電波源と思われていた電波源の多くが二重電波源であることを見出したのです。これはクエーサーだけには限りませんが、銀河系と関連しているクエーサーによくこういう例があります。このようなものの数はとても多いのです。

この二重クエーサーの多くは、お互いに離れて行きます。これはまた全く大変な新しい問題を提起します。このような天体にハッブルの法則が与える距離を適用すれば、天球上を離れて行く速さは光速度の10倍になります(3C279を例にとっていた場合)。この事実は相対論を信奉する者にとっては困ったことです。

これに対する一つの答は次のようなものです。「気をつけて、測定したのは角距離です。こういう天体はもっと近くにあり、そのために離れる速度も、もっと小さいのでしょう。(個人的には、これが私の考えていることです。) そうだとしたら、この天体についてはハッブルの法則は適用されず、光を赤い方にずらす何か別なものがあるのでしょう。」

しかし、実に悪賢い人がいて、*exotique*としか呼べないようなメカニズムを使って全く正しい理論を作りました。中心で爆発する天体があり、そこから光速に近い速度で物質が伝わって行きます。群速度と呼ばれているものは光速度より小さいのです。しかし、理論は大変複雑になるのですが、この物質の伝播に伴って波が大変大きな「位相速度」で伝わります。そこで起きることは道路をヘッドライトで照らす時に似ています。光が木から木へ移って行く時に見える速さはとても大きくなります。木は止っているのに、光束は角度で大変速く動きますが、これは連続的に出ているフォトンが木を照らすからです。月の距離にテレビのスクリーンを置いたと思っても良いでしょう。スクリーンを電子で走査する見かけの

速度は光速よりはるかに大きくなります。しかしこれは矛盾ではありません。スクリーンの各点を走査する電子は同じものではなく、陰極管の電子銃によって次々と打ち出される電子だからです。というわけで、こういうことを想像することはできます。しかし、考えたら計算してみなければなりません。そして、それはそうやさしくはないはずです。卒直に申し上げますが、私は個人的には二重クエーサーの説明としてのこのメカニズムは信用しておりません。しかし、有名な天文学者でこの説が本当だと思っている人もいます。

膨張論に対する難点の第一のグループはクエーサーによるものです。

5. 問題の第二のグループはツヴィッキーとアープによって代表される観測者によって提出されたものです。天球上で物理的に関連があるように見えるにも拘らず、その赤方偏位が同じでないような天体が発見されたのです。それはお互いに近くにあるように見え、2つをつなぐ腕が見えて物理的にも関連があると思われます。

いいかえると「見かけの速度」が違います。またいかえれば、これらの天体はハッブルの法則に従いません。有名な例をいくつか挙げましょう。

NGC 3561では三つの天体をつなぐ物質の腕が見えます。ところがこの三つのうちの二つは、7000 km/s の速度で遠ざかっているように見えますが、残りの一つはわずかに100 km/sです。

別の顕著な例に二重銀河系 NGC 7603を挙げましょう。お互いに顕著な腕とうすい腕の二本で物理的に結ばれていますが、見かけの速度の差は8000 km/sもあります。

もう一つ VV 172 の例を見ましょう(このように數え上げていくと数冊の本になってしまいます)。これは五つの銀河系が鎖状になっているように見えるものです。一つの速度は36900 km/sですが、他の四つの速度は10000 km/sです。最初のものは他のものよりうんと遠くにあるのに、たまたまそこに見えているのでしょうか? もしそうならば、なぜもっと暗くないのでしょう。そして他の四つが作る鎖のその場所に、なぜ穴があるのでしょうか。この種の天体というのは大変説得力があると思います。

もう一つの例は NGC 1199です。こういうようにして数えていくと何十にもなります。2600 km/sで遠ざかっている大変近い楕円銀河の手前に、13400 km/sの速度を持っている小さな天体があります。手前にあるのに、ハッブルの法則に従うと4倍も遠くにあることになります。

今まで述べた例でも、また他の例においても、より大きな赤方偏位をうけているのはコンパクトな天体で

す。平均として私達から等しい距離にある銀河団では、また橢円銀河と渦状銀河で赤方偏位に系統的な差が見られます。

もう一つの証拠にはかなり疑問もあります。バービッジとその協力者はクエーサーと銀河系の対を調べました。銀河系の距離はわかっています。二つの天体の間の角距離を測ると、銀河系が遠い程離れは小さいことがわかりました。これは、クエーサーが銀河系に物理的に結びついていることを示しているように思われます（クエーサーが銀河系からほぼ一定の距離にあるとして）。これはクエーサーについての古典的な考えではどうしても解釈できない関係です。しかしこの観測の統計的な価値は小さいかもしれません。それでも NGC 1073 のような天体の頻度とか、全く普通の渦状銀河系の腕の中に赤方偏位の大きなクエーサーが三つある、とかいうことを注意しておきましょう。

この節で二番目のグループに属する観測をみて来ました。つまり変な天体が物理的に結ばれていて、赤方偏位が違うもののことです。

6. パリで私達が一生懸命研究した第三のグループに属する観測というのはハッブルの法則からの外れです。

ハッブルの法則は実際、一様でも等方的でもありません。別な言葉でいえば、見かけの逃亡速度は距離によると同時に方向にもなります。

観測者は長いこと H_0 の値について一致するに到らなかったことを思い出してください。これは観測の方法や調べた天体によって異ったのです。サンデージは少し前に (1968) H_0 が 75 ± 25 と推定しました。いくつかの例しか引用しませんが、ド・ヴォークルールはスーパー・ギャラクシーの研究から 100 ± 10 という値を出し (1972)，この値は電波天文学や近くの渦状銀河系の研究によって得た値 95 ± 10 (1970) と合っています。遠い銀河団を使ったサンデージ達は反対に 55 ± 7 (1972) という値を得ています。

これらの研究は、 H_0 に非一様性があることを示しています。

スーパー・ギャラクシーを考えましょう。この銀河団のそのまた集団は、乙女座銀河団の方向に中心があります。Sc I, Sc I-II, Sc II といった銀河系の中では一様なグループを作っているものを取って調べると奇妙な結果に気が付きます。ハッブル定数を各々の銀河系について計算すると、私達の銀河系より外の方、つまり乙女座と反対の方角で明らかに減少しています。これはハッブルの法則の非一様性の一つの証拠になります。

もちろん、これは第二級の事実です。というのは、統計的にいって大変確信を持てる所までは届いていないからです。分散は大きいのですが、統計的な解析はこの事

実が意味を持っていることを示めしています。

アンリ・ポアンカレ研究所の研究者達、ノッタール、カロージ、ヴィジエ、モレス、ル・デンマ、ジャアコラによってなされた研究は、銀河団内の方向で H がどう影響するかを調べたものです。

遠くの銀河から来る光の或るものは他のものより多く赤方偏位を受けています。これは光子の通り路で物質密度が大きいことに多分関係しているのでしょうか。（クエーサーとかコンパクトな天体なので）。そうすると銀河団の後からやって来る光子を調べてみたくなるのは当然です。光が銀河団を通り抜ける時にスペクトルは赤方偏位を受けるでしょうか？そこで空を二つの部分に分けました。A 領域というのは銀河団の間、あるいは手前、B 領域は銀河団の向うです。宇宙を近い所と遠い所の二つに分けたことになります。そして B 領域では A 領域に比べて 2000 km/s 変位が大きいことがわかりました。これはそれぞれ沢山の、いろいろな性質を持つ銀河系を含む五つのサンプルについての結果です。別な言葉でいようと、銀河団を光が横切る時に光は赤い方にずれるということです。

7. この不規則性、この異様性に直面して取る態度に二つあります。現在の所この二つ共正しいと申し上げておきましょう。

一つの態度を取れば、控え目に、しかし疑いなく或る程度の保守主義で、まだ観測が明確ではないとかいって、私達がみて来た異常な観測の重要性を小さく評価します。観測結果のあるものは偶然で、またあるものは精度が悪く、ということになります。ハッブル法則の異常としてみられるものは統計的なばらつきの効果として、古典的相対論に都合の良いように局所的非一様性として片付け、最初の爆発に始まる宇宙の膨張モデルは本質的には修正する必要はないということになります。

もう一つの態度（これは或る程度私の態度であり、またジャン・ピエール・ヴィジエの態度でもあります）は現在では明らかに邪説のようにみえます。しかし、1929 年には膨張説も邪説だったのです。私達はこの理論の難点を全て解決した訳ではありません。批判も受けますし、仮説の段階をまだ脱した訳ではないことも認めます。

こういった上で新しい観測事実を古いものと一緒に説明することを試みます。私達にとっては、赤方偏位は少くとも一部は膨張以外のものによって引き起こされるものです。この現象を仮に ϕ と名付けましょう。この現象は密度の濃いところを通ることに原因しています。（特に銀河団など）。これで平均としてのハッブルの法則は説明でき、また特に異常を説明することができます。そして、たとえばクエーサーのような超高密な天体のスペクトル異常もこの ϕ という現象で説明できます。

現象 ϕ の詳細は明らかに或る条件に従わなければなりません。それを光が「疲れる」という表現で本質的に記述します。この言葉は私達の作った言葉ではなく、例えばマックス・ボルンのような偉大な物理学者が大昔に使っています。光が或る粒子に当たるとエネルギーを分け与え、このため波長は長くなります。光のエネルギーはその波長に反比例しているからです。また光子が次々と衝突するにつれて光は屈折されます。この衝突は光の赤方偏移には充分であるが、光を吸収したり遠くの銀河系の像を変形したりはしないことを示さなければなりません。しかし光子は一体どんな粒子と衝突するのでしょうか。理論と観測から要請される性質を持った中性粒子でスカラー・ボゾンの ϕ というものを考えましょう。このスカラー・ボゾンの質量は電子の質量よりもはるかに小さく、光子の質量よりもはるかに大きいものです。光子質量も無視することはできません。この ϕ 粒子はスカラー的、つまりスピンが零でなければなりません。

この衝突の理論を厳密に説明することもできますが、それは難解で計算量も膨大になるのでここではこれまでにしておきましょう。このメカニズムが「光の疲れ」のメカニズムですが、詳しいことは専門的な論文を見てください。本質的に光子の静止質量が零でなく、質量に結びついたスカラー・ボゾンがあることが示されています。

さて膨張はどうなったでしょうか。仮想的な三つの光子の「可能な歴史」を考えましょう。一つは「コンパクト」な対象から来、もう一つは普通の銀河系から出て銀河団を通り抜けて到着、三番目の光子は観測者から L_i の所にある普通の銀河系から来るものとしましょう。

全空間にボゾン ϕ があり、質量の多くある所にはより多くあると仮定すると、コンパクトな天体の近くと銀河団を横断した時には余分な赤方偏位があり、その他に三つの場合とも普通のハッブル効果が成り立ちます。このハッブル効果の原因は膨張か、ボゾンによるエネルギー損失か、或いは両者の結合したものか、ということになります。「光子の可能な歴史」といったのはこういう意味です。もちろん、私にも確信はありません。正常なハッブル法則は、膨張項と疲れの項の二つの和として表われます。膨張を除外するわけではありませんが、膨張は実証されてはいないのです。

膨張説を支持する有力な論拠は、私が今日少ししか話さなかった他の現象、特に宇宙論的といわれる 3°K 輻射の存在、を説明できるのは膨張説だけだ、ということです。この輻射が存在することは確かで、この現象が現代の天文学に大変重要だということとも確かです。しかし二つの理由によって、この論法の弱点が表われます。まず、この輻射はほとんど等方的であるのにハッブルの法則は等方的ではありません、最近測定された 3°K 輻射

の非等方性はハッブル定数の非等方性とは一致しません。このことは問題の輻射の起源が宇宙論的でなく局所的であることを示唆しています。ところで、疲れた光の理論はこの現象を説明することができます。観測よりはるか以前、1954年にフィンレイ・フロイントリッヒとマックス・ボルンによってこのことは予見されていました。こういうわけで二様に説明可能ですから、この現象が膨張を意味するとは言い切れません。

他の論拠は 3°K 輻射の論拠よりも強いのですが、私の意見ではまだあいまいです。軽元素、特にデューテリウムとヘリウムの量について考えてみましょう。私達の知識では時間的に無限な、ずっと存在していた宇宙という概念に反対するものはありません。この仮説に反対するために、時に熱力学の法則が持ち出されます。熱力学第二法則によると、進化は非可逆です。しかし、平衡からはるかに離れた状態にある宇宙というシステムに、熱力学第二法則を適用できるでしょうか。

最小限言えることは、ハッブルの法則にしろ宇宙論的輻射にしろ宇宙の化学組成にしろ、膨張説が是か非か言い切れるだけの事実ではないということです。膨張か？ 非膨張か？ このことについて、私は何を知っているでしょう？ 皆は何を知っているでしょう？ 一種のドグマとなった膨張とビッグ・バンについて私が述べてきた疑いは、残念ながらまだ宇宙論の小数派にしか受け入れられていません。

結論にあたって、二つの著名な意見を引用したいと思います。1970年にレオン・ブリルアンはその遺作に次のように書き残しています。「宇宙の曲率を仮定するか、光子の静止質量が零でないとするかのどちらかである。この零でない質量は量子物理学のあらゆる面で確かめられる。」ノーベル物理学賞を受けたスウェーデン人のアルフヴェンは、1976年にもっとはっきり述べています。「ビッグ・バンは納骨堂の中で名誉的な位置を受けるに値する、すばらしい神話である。この納骨堂には既に、循環する宇宙についてのインドの神話とか、支那の宇宙の卵とか、聖書にある六日間での創造等が納められている。しかし、我々は何も得ていない。」

私はいつもアルフヴェンを引用し、その結論は、また私の結論もあります。「私達は、今日ビッグ・バンが占めている場所を他の神話で置き換える試みたが、何も得ていない。」

ペケール教授は昨秋フランス外務省派遣の学術使節として来日された。この文は東京の日仏会館で9月20日に行われた講演の原稿を成相が翻訳したもので、日仏理工科会誌30号（1980年2月）に発表される予定であるが、同誌の御好意により天文月報にも掲載を許可していただいた。
成相恭二