



| | |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Title | 宇宙の3K輻射とインフレーション |
| Author(s) | 細谷, 暁夫 |
| Citation | 大阪大学低温センターだより. 1986, 53, p. 8-11 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://hdl.handle.net/11094/10741 |
| rights | |
| Note | |

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

宇宙の 3 K 輻射とインフレーション

理学部 細谷 暁夫 (豊中 4112)

§ 1. はじめに

宇宙のかなたからマイクロ波領域の電磁波が等方的にやってきていることは、最近のような宇宙時代では、よく知られているようです。しかも、その起源は宇宙の始まりにさかのぼるらしいので、霊妙な媒体のように思う人もいます。一方、家庭用テレビの放送終了後に映る砂嵐のような雑音の数%はそれだと教えられると、最初の発見者である Penzias と Wilson に対しても親しみがもててきたりします。この電磁波は、その強度スペクトラムが温度 2.7 K の黒体輻射のものとよく合うので、3 K 背景輻射と呼ばれています。ここでは、その 3 K 輻射の観測事実が、 10^{-35} 秒というきわめて初期の宇宙についていかに強い示唆を与えているかという解説を試みます。

§ 2 "3 K" の意味と膨張宇宙論

もちろん、今の宇宙は全体が熱平衡になっていることなどはないし、したがって "3 K" といってもスペクトル分布のパラメタの意味しかもちません。ただし、なぜ 3 K 分布になったかは説明を要します。そのためにまず膨張宇宙論を簡単におさらいしておきます。

宇宙は、どこへ行っても、どの方向を見ても同じように見えるという、一様等方性を仮定します。すると力学量は、平均的な銀河間の距離の相対的な伸びだけになり、それをスケール因子、 $a(t)$ と呼びます。現在の宇宙のだいたいのイメージとしては、半径 1 km の風船の表面 (宇宙) に 500 円銀貨 (銀河) を 1 m 間隔で張ったものを思い浮かべればよろしい。

風船の半径が $a(t)$ でこれが時間とともに変化するわけです。

空間座標としては、各銀河に張りついたものを採ると便利で、図 1 でいうと角度 χ にあたります。する

すると計量は、

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) d\chi^2 + (\text{3次元極座標の部分}) \dots\dots\dots (1)$$

となります。

$a(t)$ の時間発展はアインシュタイン方程式が与えてくれますが、たいへんうまい事に、結果はニュートン力学で解ける形をしています。

$$\ddot{a}^2/2 - G \cdot \frac{4\pi a^3}{3} \rho/a = \text{一定} \dots\dots\dots (2)$$

$$(\rho a^3)' + p (a^3)' = 0 \dots\dots\dots (3)$$

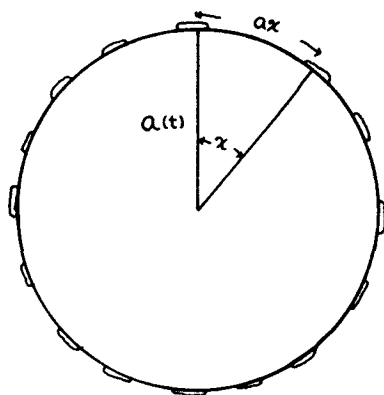


図 1. 風船の表面 = 宇宙

ただし、 G はニュートンの万有引力定数、 ρ はエネルギー密度、 p は圧力です。(2)式は、半径 a の球面内にある質点の運動エネルギーとその内部の総質量が及ぼすニュートンポテンシャルの和が一定ということですし、(3)式は熱力学の第一法則そのものです。以下では簡単のために、(2)式の一定値を 0 にとります。

さて、現在の宇宙では、圧力はないと考えられますので、(2)(3)式から $a(t) \propto t^{2/3}$ という膨張する解が得られます。

<Hubble の法則>

銀河間の距離、 $r(t) = a(t) \chi$ (図 1 参照) はたしかにひろがりますが、その後退の速さは $v = \dot{r} = \dot{a}/a \cdot r = H r$ となり、距離に比例します。これは Hubble の法則に他なりません。

遠くの銀河ほど速く後退しているわけですから、遠くの銀河から来る光ほど Doppler 効果のためにより赤い方に波長がずれることになります。現在のところ、 $H^{-1} \doteq 100$ 億年と見積られており、これがだいたい今の宇宙の年齢の目安を与えます。

<ビッグバンの化石としての 3 K 輻射>

以上から、3 K 光子は実は遠方の高い温度の所から発したものであるけれども、途中で膨張宇宙のために大きく赤方偏移したもののなれの果てであることがわかります。それは光子がイオン化した水素と熱平衡にあった、温度四千度のところ(宇宙のはじまりから百万年)に起源をもつ一種の化石であるということになります。

§ 3 3 K 輻射の等方性と地平問題

観測によれば、3 K 輻射の等方性はおどろくほどよくて、

$$\Delta T/T < 10^{-4} \dots\dots\dots(4)$$

の精度で成り立っています。つまり、西の方から来た光子も東の方から来た光子も同じ温度で出発したことになりますが、東の涯と西の涯は大変な距離をへだたっているのに示し合わせたように同じ温度であるという点は不思議です。

<地 平>

その疑問を明白な形にするために、因果関係の及ぶ最大の距離をしらべてみましょう。動径方向に進む光の径路は、

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) d\chi^2 = 0 \dots\dots\dots(5)$$

で与えられます。すると、宇宙の始まりから出発して、時刻 t までに光が到達しうる距離は

$$l(t) \equiv a(t) \int d\chi = a(t) \int_0^t c dt' / a(t') \dots\dots\dots(6)$$

で与えられます。これが、因果関係の及ぶ最大の距離で、(粒子)地平と呼ばれているものです。

$a(t) \propto t^{2/3}$ の時には、おおよそ ct です。これを図 2 に示しておきました。

これを見てすぐわかるように、今見えている宇宙は過去には、相互に因果関係のない多数の小さな領域から成り立っていた事になります。特に、光が物質と分離するころは、地平の寸法は全宇宙の百分の三程度という小ささです。即ち、3 K 背景輻射も 10° くらいの角度の範囲で一様なのは当然としても、それ以上の範囲で一様の温度であるというのは因果律から考えて不自然です。これを地平問題といいま

す。

§ 4. インフレ宇宙論は地平問題を解決する

地平問題をコロンブスの卵的に解決し、同時に際めて初期の宇宙におこった革命的な事件を予言(?)したのが、佐藤勝彦、A.GuthとA.Lindeです。そのアイデアは、図3に示すように、ある時期宇宙が指数関数的に膨張し、地平の方はその間、ほぼ一定であればよいというものです。 $(a(t) = e^{ht}$ ならば $r(t) = h^{-1}$ で一定)

<宇宙の相転移>

当然ながら、このような急膨張の原因が問題になります。まず、アインシュタイン方程式(2)において、エネルギー密度 ρ_0 を一定とすると、

$$\dot{a}^2/2 = G \frac{4\pi a^3 \rho_0}{3} / a \equiv h^2 a^2 / 2$$

となり、指数関数的に膨張する解

$$a(t) = e^{ht} \dots\dots\dots (6)$$

を得ることができます。 ρ_0 が一定ということと(3)式から、圧力は $p = -\rho_0$ と負になります。

感覚的に言うとその負の圧力のために、物質が外へと急激に吸い出されていると言っていいかもしれません。

さて、このような指数関数的な急膨張は、宇宙のある時期にだけおこり、それ以後はふつうの宇宙に戻ってくれないと困ります。そのために、初期の宇宙に相転移があったとするのが、インフレ宇宙モデルの基本的なアイデアです。

自由エネルギーを ρ , ϕ を何らかの秩序パラメタとして、高温側 ($T > T_c$) で ρ は図3 Aの形をしており、低温側 ($T < T_c$) で図3 Bのようであったとします。宇宙の温度が充分高い時には秩序パラメタ ϕ は最小値0にあります。宇宙膨張のために輻射や物質のエネルギー密度が下り、底上げ分の ρ_0 の方が重要になると、宇宙は指数関数的膨張をはじめます。すると、温度は急に下って、図3 Bのようになり、秩序パラメタは最小値 ϕ_v の方に落ちていきます。そして底のあたりで何回か振動するうちに、エネルギーを輻射の形で散逸・解放します。最後はふつうの宇宙に戻るわけですが、その間に宇宙は非常に大きく成長してしまうわけです。

<素粒子の統一理論>

そのような相転移とは何なのでしょう。一つの考えとして、素粒子の強・電磁・弱の3つの力が区別できないような高温の相から、区別できる相への転移が考えられています。その時の秩序パラメタは

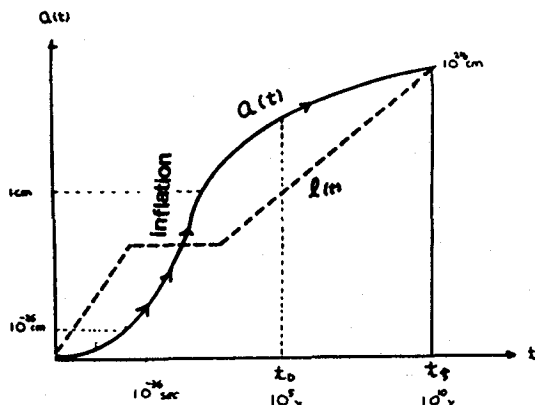


図2. 宇宙の大きさと地平

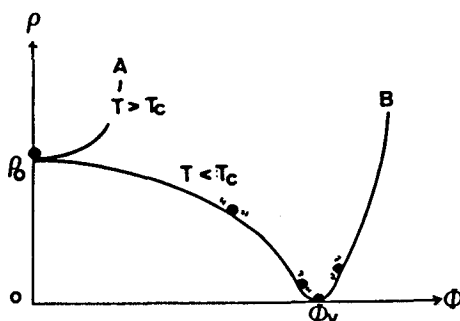


図3. 宇宙の相転移

ヒッグス場 ϕ がそれにあたります。大ざっぱに言って $\phi \neq 0$ だともろもろの粒子に質量を与える役割をするものです。

このモデルでは、すべてのエネルギースケールが 10^{15} GeVですので、 kT_c もそれくらいです。時刻は約 10^{-35} 秒で、インフレ前の宇宙の大きさは 10^{-26} cm でインフレ後は約1 cmに成長します。

§ 5 おわりに

かなり端折って書いてきましたが、問題は宇宙という膨張する容器の中の相転移で、途中の非平衡過程を時間を追って調べなければならないので、実際は複雑です。物性の専門家から見て基本的な誤りがあるかもしれません。その時はよろしくご教示ください。

参考文献

- (1) 佐藤勝彦：自然 1983年5月号 67ページ。
- (2) 阪上雅昭：大阪大学博士論文。