

中学生のためのインフレーション理論

Inflation Theory for Junior High School Students

佐々木翔太*・佐藤 松夫*

Syota SASAKI・Matsuo SATO

要旨

宇宙の地平線問題とそのインフレーション理論による解決という概念を中学学習指導要領で定められている知識レベルで教えることが可能である。特に、単なる断片的な知識の羅列ではなく、物理を理解させることが可能である。

キーワード：中学学習指導要領、インフレーション理論、地平線問題、加速度

1. 導入

宇宙の地平線問題とそのインフレーション理論^{1,2)}による問題の解決という物理を中学学習指導要領の予備知識で教えることが可能かどうか検討することが本研究の目的である。

宇宙の理論の基本はアインシュタイン方程式で記述される。このような内容を中学生に教えようとするとどうしても断片的な知識を与えることに終始してしまう。それでは中学生に物理の面白さに気付かせることは不可能である。よって、我々は宇宙のインフレーション理論の物理を中学生に理解させる研究を行う。

宇宙の進化としては、宇宙は火の玉として生まれたとするビッグバン宇宙論が長らく信頼されてきた。しかしそれには地平線問題や平坦性問題などといった大きな問題点があった。真空のエネルギーによって初期宇宙は指数関数的膨張をするというインフレーション理論は、上記のような問題を解くことができる理論である。本研究では、比較的理解しやすい地平線問題を取りあげてインフレーション理論について解説を行う。

本論文の構成は以下の通りである。2章では研究の結果である、中学生のための地平線問題とインフレーション理論の解説を提示する。3章では2章の結果を得るために行った、中学学習指導要領と大学で学習するインフレーション理論との比較について記述する。特に、そのギャップを埋めるためのいくつかの方法について例示する。

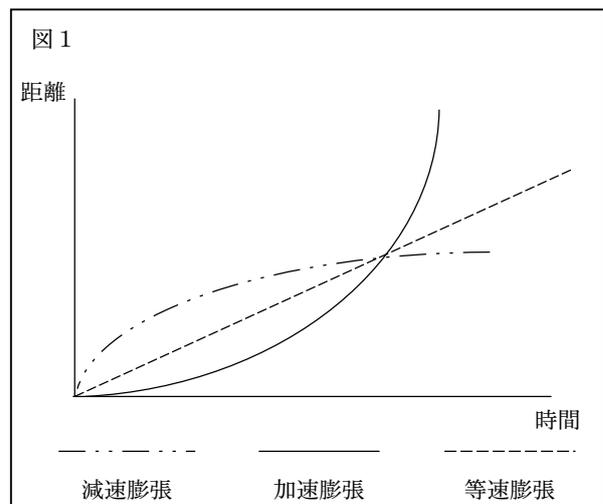
2. 中学生のための地平線問題・インフレーション理論

2-1 はじめに

我々は宇宙に存在する地球上で生活している。宇宙はどのようにしてできたのか、現在の形は過去も未来も同じなのか、などということを考えたことがある人もいるのではないだろうか。ここでは、宇宙がビッグバンにより生まれたあと急速に広がったとする宇宙初期を記述するインフレーション理論について述べる。

2-2 地平線問題

様々な観測の結果、我々の宇宙はほとんどの時期で減速膨張していたことがわかっている。まず初めに、減速膨張・等速膨張・加速膨張の3つの膨張の仕方について触れておこう。これらをグラフにしてみる。(図1)

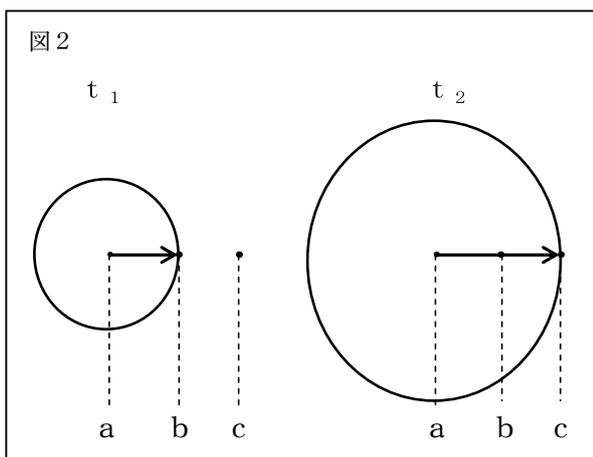


* 弘前大学教育学部理科教育講座

Department of Natural Science, Faculty of Education, Hirosaki University

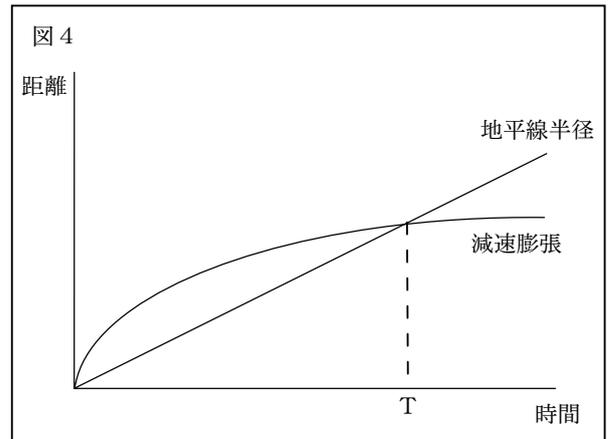
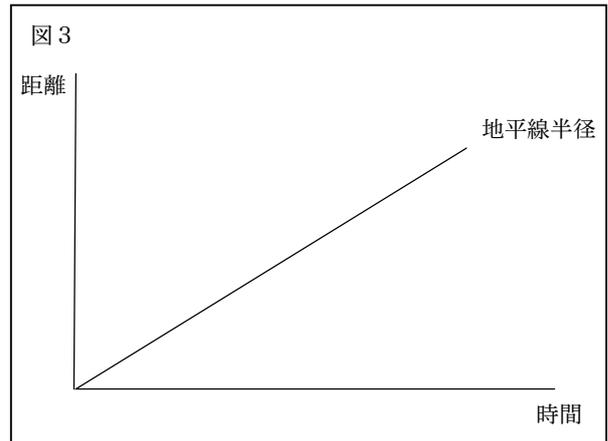
3つの場合すべてで時間とともに2点間の距離は大きくなっていくことに違いはない。減速膨張とは時間が経つごとに2点間の距離の広がる速さが小さくなる膨張である。つまり時間が経つと2点間の距離はほとんど変わらなくなる。逆に加速膨張では時間が経つごとに2点間の広がる速が大きくなる膨張である。つまり時間が経つごとに2点間の距離はどんどん離れていく。

ところで、宇宙が誕生してからずっと減速膨張してきたと考えると地平線問題という問題が生じてくるのである。ではまず地平線とは何かについて考えよう。図2を見よう。例えば、a地点b地点c地点が一直線上にありそれぞれに人が立っているとしよう。そしてそれぞれの距離は光が一瞬では届かないほど遠いとする。今、a地点の人が時刻 t_1 に全方位に光を発したとし、時刻 t_1 では光はa-b間まで進み時刻 t_2 では光はa-c間まで進むとする。時刻 t_1 では、半径a-b以内にいる人であればこの光を見ることができa地点の人の情報を受け取っているためa地点と関係性があると言える。しかし半径a-bより遠くにはこの時点では光は届いていない。光よりも速く伝わる物質は存在しないので、時刻 t_1 ではa-b間の距離が関係性を持つ最大の距離である。このように宇宙が始まってからの時間 t における互いに関係性を持つことができる最大の領域の境界のことを地平線とよぶ。また、時刻 t_2 では半径a-cまで光が届いているため地平線は半径a-cの円となる。このことから地平線は時間がたつごとに広がっていくことがわかる。



地平線半径と時間との関係をグラフにすると、図3のようなグラフになる。ここで減速膨張している宇宙の大きさのグラフと地平線のグラフを重ねてみよう。

図4を見ると初めは地平線の外にあった2点が時間経過とともに地平線内に入ってくるのがわかる。注目



すべきは、 T 以前ではこの2点は常に地平線の外にあるということである。実際に観測より、宇宙初期に地平線の外にあった領域が存在するということがわかっている。

一方で最近のCOBEやWMAPなどの宇宙マイクロ波背景放射の観測によって、宇宙初期に発せられた天球上の全方向からくるマイクロ波の温度がほぼ一様に -270.3 度であり、すべての領域が相関していたことがわかった。しかしこれは相関のない地平線の外にあった領域が存在することと矛盾する。これが地平線問題である。そしてこの問題を解決することができるのがインフレーション理論である。

2-3 インフレーション理論

減速膨張している宇宙での地平線と宇宙の大きさとの関係を述べたが、では宇宙が加速膨張している場合ではどうなるのであろうか。今度は加速膨張している宇宙の大きさの図と地平線の図を1つの図に表してみよう。(図5)

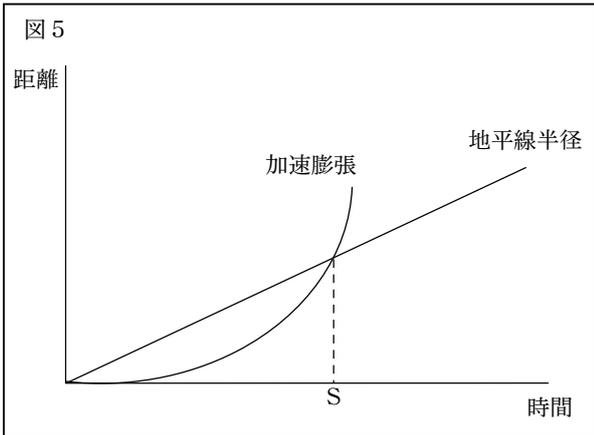
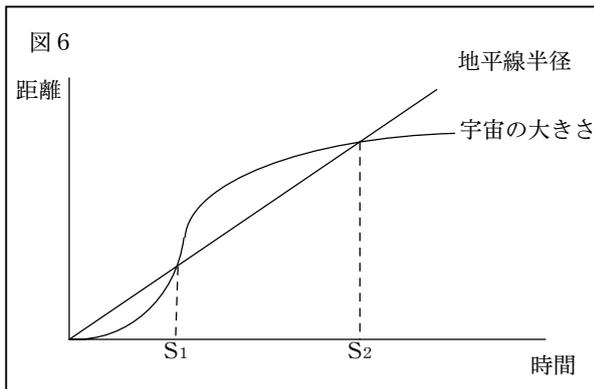


図5を見るとS以前は地平線内にあった2点が、Sを過ぎると地平線の外側へと出て行くことがわかる。このように、加速膨張している宇宙では時間が進むと地平線内の領域が地平線外に出ていくということが生じる。では、宇宙初期に宇宙が加速膨張したとするとどうなるだろうか。地平線内にあった領域が地平線外へと出ていくことが可能である。その後減速膨張をすると図6のようにもう一度地平線内に入る。これで地平線問題は解決される。



このように、インフレーション理論は宇宙初期に $1/10^{10}$ 秒間で 10^{30} 倍もの大きさに広がる加速膨張をしたのち、再加熱とよばれる現象により減速膨張に変わったとする理論である。宇宙がインフレーションを起こした原因としては真空の相転移に伴う真空のエネルギーだと予想されている。相転移とはたとえば、水蒸気（気相）から水（液相）に変わることである。宇宙の極初期は宇宙空間が高温相の真空と呼ばれる状態にあり、現在の低温相の真空よりも非常に高いエネルギー状態にあった。その高いエネルギーによって急激な膨張が引き起こされたと考えられている。そして真空の相転移の後宇宙の温度が下がった。³⁾ さらにインフレーション理論は地平線問題だけでなく平坦性問題などといった宇宙初期の様々な問題を解決することができる理論である。

3. 中学指導要領との対応

宇宙の時間発展は次のアインシュタイン方程式で記述される。

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G \cdot T_{\mu\nu}$$

$G_{\mu\nu}$ はアインシュタインテンソル、 G は重力定数、 $T_{\mu\nu}$ は宇宙を占めるエネルギー、運動量、圧力の分布を表すエネルギー運動量テンソルである。

宇宙の大規模構造では、宇宙には特別な場所も方向もなく一様等方な状態であるとする宇宙原理が成り立つと考える。⁴⁾ この宇宙原理を仮定すると、宇宙の計量は

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) d\sigma_k^2$$

で表される。⁵⁾ ここでは光速を表し、 $a(t)$ は各時刻 t における空間の大きさを表す関数であり宇宙のスケール因子とよばれる。 $d\sigma_k^2$ はロバートソンウォーカー計量である。⁶⁾

そして宇宙の状態方程式とアインシュタイン方程式を解くと宇宙の状態に応じて

- $a \propto t^{1/2}$ 放射優勢宇宙 (減速膨張)
- $a \propto t^{2/3}$ 物質優勢宇宙 (減速膨張)
- $a \propto e^t$ 宇宙項優勢宇宙 (加速膨張)

を得る。

大学では上記の式を二階微分して加速か減速かを判定するが、中学校学習指導要領では、 $y=x^{1/3}$ などの関数を扱わず、微分を指導しないので、これらの数式の定性的性質を失わずにグラフで視覚化して説明つけた。

地平線問題を解決するにあたっては加速膨張であればよく、また、中学校学習指導要領では指数関数は指導しないので、指数関数的に膨張するという説明はしなかった。しかし、宇宙が加速膨張しているという解は上式からもわかるとおりに指数関数的に膨張する解のみであるので、インフレーション期では宇宙は指数関数的に膨張していく。また、平坦性問題などを解決するためには、指数関数的に急激に膨張をする必要がある。

このように今回の研究によって、地平線問題の解決という意味ではインフレーション理論の物理を中学生

に理解させることが可能であるという結論を得た。

文献

- 1) K. Sato, "First-order phase transition of a vacuum and the expansion of the Universe", Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 195, 467, (1981).
- 2) A. H. Guth, "The Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems", Phys. Rev. D 23, 347 (1981).
- 3) 福江 純 宇宙のしくみ 日本実業出版社 (2008) 89-99
- 4) 佐藤 勝彦 宇宙論 1 日本評論社 (2008) 39-74 177-212
- 5) 佐々木 節 一般相対性理論 産業図書株式会社 (1996) 152-172
- 6) 小玉 英雄 一般相対性理論 岩波書店 (2000) 268-293

(2014. 1.14 受理)