

講演 1

宇宙のはじまり

基礎物理学研究所教授 田中 貴浩



最初の講演者ということで代表しまして、皆さんお集まりいただきまして、ありがとうございます。京都大学の基礎物理学研究所というところで研究させていただいています田中貴浩です。

今日は「宇宙のはじまり」ということでお話しさせていただきたいと思いますが、目次は宇宙の果てを見ると、ビッグバン宇宙論という、非常に確立している部分の話をまずさせてもらって、その先、今現在の宇宙論の最先端であるインフレーション宇宙というパラダイム、この紹介をさせていただきたいと思います。(スライド1, 2, 3)

スライド2にうっすらとある、さらに宇宙のはじまりに関するところには、ここが実は本当の研究の最先端なんですけれども、今日は45分の時間ということで、なかなか、そこまではお話ができないかと思うんですけれども、このあたりの話をさせていただきたいと思います。(スライド4)

宇宙のはじまりということを議論するときに、まず、はじまりが説明できたとして、そうすると、常にはじまりのその前は、どうなっているんだろうという疑問がわいてきます。そのように考えると、結局、宇宙のはじまりはどうなっているのだろうかという、こういう疑問というのには答えがない、どこまで行っても終わりがない。どこまで行っても終わりがない研究をして、どこまで行っても研究するテーマが残っているということでよいのかもしれない。しかし、それではどこまで行っ

宇宙のはじまり

田中貴浩(基礎物理学研究所)

(スライド1)

目次

- 宇宙のはて
 - ビッグバン宇宙
- 見える世界のその先
 - インフレーション宇宙
- 宇宙のはじまり
 - 更なる発展へ

(スライド2)

宇宙のはて ビッグバン宇宙

(スライド3)

でも最終的な答えは得られないんじゃないかというふうに思われるかもしれませんが、現在の宇宙論というのは、そこそこには皆さんが満足するような答えを、ある程度得ている。ただ、本当に宇宙のはじまりはどうかというと、まだまだ分からないことがあると、そういうお話になるかと思えます。(スライド5, 6)

まずは、よく分かっているとされているところから説明を始めたいと思います。もうこれは100年以上前です。アインシュタインが特殊相対論という理論を打ち立てました。これは出発点としては、光速度不変の原理という非常に驚くべき原理から出発しているわけです。

例えば、ロケットから光を照射するわけですが、光の速さというのは秒速30万キロメートルだといわれていますが、例えば、こんなロケットは実際には存在しないですけども、10万キロメートル毎秒というスピードで飛んでいるロケットから光を出すと、一見10万キロから30万キロを出すのだから、全体出てくる光の速さは40万キロメートル毎秒になるんじゃないかと思うわけですが、それでも光の速さは30万キロメートルである。こういう原理を出発点にして理論を打ち立てます。

この光速というのは、実際、だから、あらゆるものを非常に速く加速していったときの速度の限界を表している量であって、だから、どうやっても、それを超えることはできない。だから、光より早く伝わるものはないという話になる。

一時期、超光速ニュートリノとかいう話題が世間をにぎわせて、その後どうなったのだろうかとされているかもしれないですけど、これは実際には、そういうことはなかったということになっています。(スライド7)

この光速が有限なので、昔の宇宙を見るということは、どういうことかということ、結局、

宇宙のはじまりって？

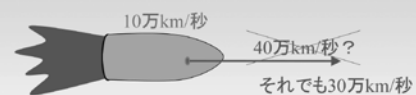
- 始まりが説明できたとして、
 - では、そのはじまり以前はどうなっているのか？という疑問が湧いてくる。
- ↓
- ということは、結局、宇宙のはじまりはどうなっているのかという問は、答えのない問なのだろうか？

(スライド4)

まずは、よくわかっている
ことから始めましょう。

(スライド5)

1905年 アインシュタイン 特殊相対論
光速度不変の原理

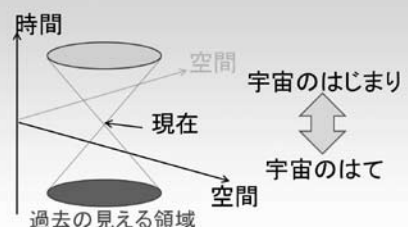


光速＝あらゆるものの速度の限界
光よりも早く伝わるものはない

超光速ニュートリノ

(スライド6)

昔をみること＝遠くをみること



(スライド7)

遠くを見るということになります。遠くを見ると、それは過去からやってきた光を見ているということになるというわけです。

そうすると、どんどん空間的に遠いところを見てやると、時間的にも過去を見ているということにつながるわけです。だから我々は、宇宙のはじまりを見ようと思うと、それは結局、宇宙の果てがどうなっているのかということを見ようとしていくと、そういうことになります。(スライド8)

この過去の宇宙をひもとくという作業なんですが、これは観測がもちろん重要なわけですが、私のいる基礎物理学研究所というところは理論を研究しているところなんです。理論の立場から行くと、重要になるのはアインシュタインが打ち立てました一般相対論。

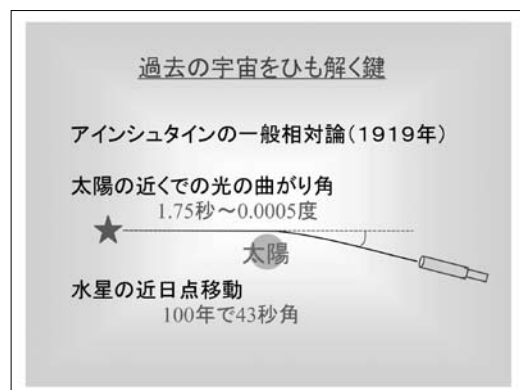
これは1915年にさかのぼりますが、時空、重力の理論です。つまり、万有引力を記述している物理法則なわけですが、ニュートンが言ったような、あらゆるものが重力で引き合っているというのではなくて、物があると、時空、時間とか空間が少しゆがんで、その結果お互いが力を及ぼし合っているようにみえるのだという理論です。

太陽の近くでの光の曲がり角の予測があって、それが一般相対論の予言と非常によく合うとか、あるいは惑星である水星の太陽に一番近づく位置というのは、公転の度にほんの少しずつずれているわけですが、その角度の予言、これも一般相対論によって非常に正しく予言されるということが分かっている。

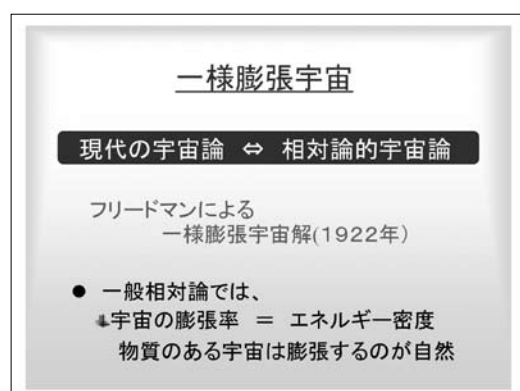
ということから、そのほかにもたくさんの傍証はあるわけですが、一般相対論というのは、非常に我々の宇宙を正しく記述しているよい理論だと思われています。だから、現在の宇宙論というのは、この一般相対論を使った一般相対論的な宇宙論ということになります。(スライド9)

この一般相対論的宇宙論の枠組みで考えると、宇宙というのは定常に今現在の姿のままずっとあり続けるということができないということが導かれます。

一般相対論が見つかって、初期の段階にフリードマンによる一様膨張宇宙解という、宇宙は膨張しているという解が見つかったわけですが、これ、どうして定常でいられないということになるのかというと、この一般相対論では非常に大ざっぱにいうと、宇宙が膨張する膨張の割合と、宇宙に満ちている物質のエネルギー密度（エネルギーがどれぐらいの濃さで満ちているかということですが）、との間に関係がついている。したがっ



(スライド8)



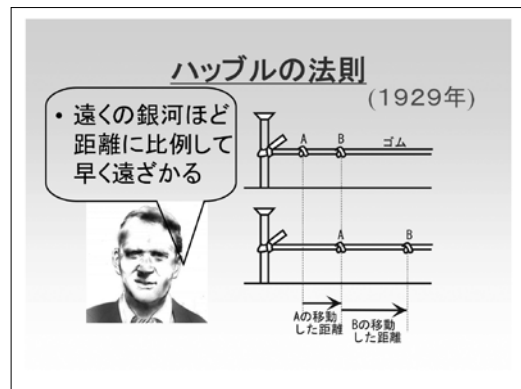
(スライド9)

て、宇宙にエネルギーがある限り、宇宙はどうしても膨張してしまうというのが、一般相対論が予言するところです。(スライド 10)

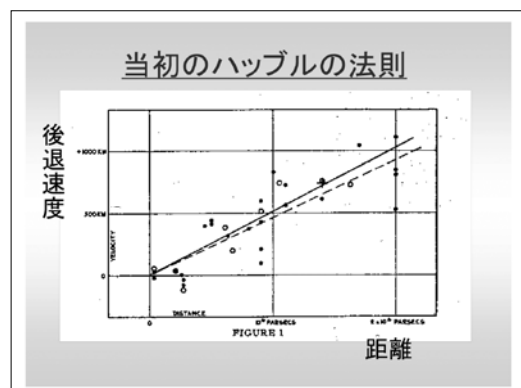
これに対してハッブルがハッブルの法則ということを言い出しました。これは遠くの銀河ほど、距離に比例して速く遠ざかるという命題です、この絵で説明したいと思うんですけども、一様膨張するというのは、こういう感じのことをいっています。ここにくぎを打って、ゴムをつけて結び目がつくってあります。この最初の結び目までの長さで次の結び目までの長さが同じ長さになっているんですが、このゴムを引っ張って、全体に一樣に引き伸ばしてやると。そうすると、ここの長さと、ここの長さは変わらないわけですね。だけど、この始点のところから考えると、Aが移動した距離はこれだけです。Bが移動した距離はこれだけ。Bが移動した距離のほうが2倍になっているわけです。つまり、遠くのもののほうが移動する距離が多い。移動する距離が多いということは、移動の速度が速いということを意味しています。遠くのもののほうが、速く我々から遠ざかっていって見えるという、そういうことを表しています。(スライド 12)

宇宙を深く見ると、たくさんの銀河が見えるわけです。天上に見えているのは星かもしれないですけども、望遠鏡で見たときに広がって見えているものは、多くが銀河なわけです。星が集まった集団です。こういう銀河が、どういう速度で我々から遠ざかっていっているか、どういう距離にあるのかと、こういうのを観測してやるわけです。観測してやって、プロットしていきます。これは横軸が距離です。縦軸が、どれだけの速度で我々から遠ざかっていっているかと、当初ハッブルが、ハッブルの法則を見つけたときのプロットがこれだというんですね。これを見ると、直線の周りにきれいにプロットしたデータ点に乗っているというふうには見えないんだけど、こういうふうに「えいっ」と直線を引いて、ハッブルの法則としたと言う訳です。(スライド 13)

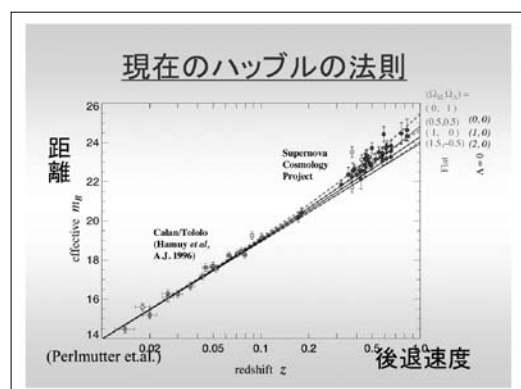
これは現在のハッブルの法則というべきもので、このぐらいデータが非常にしっかりとってきて、先ほどとはちょっと横軸と縦軸が変わっていますが、横軸が後退速度で、どれだけの速度で遠



(スライド 10)



(スライド 12)



(スライド 13)

ざかっているかです。縦軸のほうが距離に対応するような情報を書いています、先ほどみたいに非常にエラーが大きいプロットではなくて、非常にきれいな線に乗っているということが分かります。これで非常に高い精度で宇宙が膨張していることが、観測的にももう現在は確かめられています。(スライド 14)

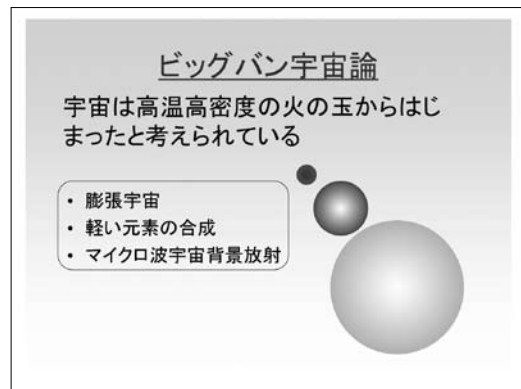
さて、ビッグバン宇宙論なんですが、ビッグバン宇宙論というのは、宇宙が高温高密度の火の玉から始まったと考えるというシナリオです。これは、今宇宙は膨張しているということが観測的に、はっきりしているのを、それを過去にさかのぼっていくとどうなるかと考える。そうすると、どんどん過去に向かって、宇宙は収縮していくわけです。収縮していくと、密度は高くなって行って、温度も高くなっていくだろうと考えられるわけです。

そのときに、そういう宇宙のシナリオを考えると、予測されることの一つは今現在の膨張宇宙ですが、さらに我々をつくっている元素の組成が予測されます。水素だとか、ヘリウムだとか、酸素だとか、炭素だとか、いろいろと元素がありますが、こういう元素の中で特に軽い水素だとか、ヘリウムだとか、そういう軽い元素が、どうやって合成されたかということが、このシナリオによって非常によく説明できます。

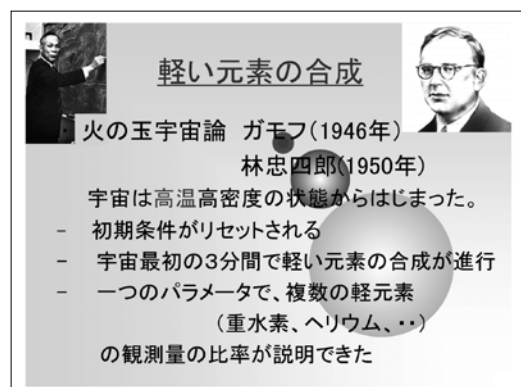
さらにマイクロ波による宇宙背景放射というのが見つかった。これが、このビッグバン宇宙論の証拠だとされているわけです。(スライド 15)

まず軽い元素の合成なんですが、この火の玉宇宙論、最初に非常に高温高密度の状態から宇宙がはじまりましたとするのは、これはガモフとか、そのほかの人たちによっていわれたんですが、日本の林忠四郎先生も、この火の玉宇宙論の形成に貢献されました。このシナリオの基本的な前提は、何度も繰り返していただきますけれども、宇宙は高温高密度の状態からスタートしましたという仮定です。

こういうシナリオを考えると、何がいえるのかということなんですか、最初に宇宙が非常に高温高密度になっていると、その宇宙の初期が、どういう状態からはじまったのかということを、我々が手でいろいろと指定してやらなくても、高温高密度であるということだけで、ほとんど初期条件が決まってしまうということです。非常に温度が高くなると、もうすべてのものがトロトロに溶けてしまって、それは、「全部気体になっている」みたいなことが容易に想像できると思うんですけれども、それと同じようなことが起こります。宇宙の温度を決めてやると、そのときの状態というのがほぼユニークに決まる。

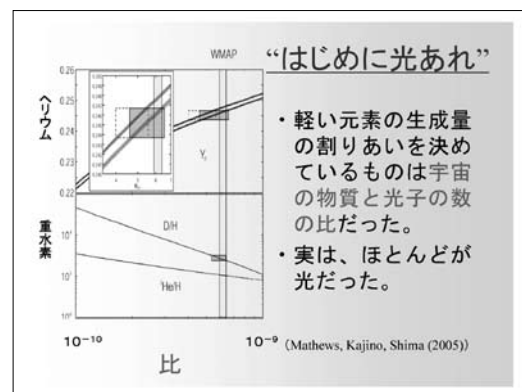


(スライド 14)



(スライド 15)

そういう温度によって定まった状況から宇宙が膨張していくことによって、宇宙が冷えていくわけです。その冷えていく過程において、軽い元素の原子核が合成されていくわけです。そのとき、実は1つだけパラメーターがあって、この1つのパラメーターを適当な値に選ぶことによって、複数の軽い元素の観測量の比率を説明することに成功したというのが軽い元素の合成の理論の成功とされています。(スライド 17)



(スライド 17)

ここに、ちょっと絵を持ってきましたが、その1つの量というのは何かというと、軽い元素の生成量の割合を決めているものとして、宇宙の物質と光子の数の比というのがあります。宇宙の物質というのは、後からも出てきますが、我々、陽子だとか中性子だとか、電子とか、そういうもので原子が構成されて、そういうものをもとにして我々の体も、いろいろな物質もつくられているわけですが、その物質の構成単位である陽子だとか、中性子の数のことを物質の数とよんでいます。

我々の日常生活の中では、物質の数というのは増えたり減ったりしないわけですが、それに対して、光の粒である光子、光は発生させたりすることができるわけで、このライトも、どこかにあった光を持ってきているわけじゃなくて、新たに発生させているわけですが、ただ、宇宙の空間の中では、光が新たに発生するという事は、ほとんど起こらなくて、もともとあった量が保たれるということになっております。

それはなぜかということ、先ほど言いましたように、温度が高い状態になると、すべてのものが温度だけで決まる状態になるという言いました。そのときには、光はもう最大限その温度で必要なだけの光が満ちあふれている状態になっています。だから、何か反応を起こしても、光の総量はたいして変わらないということになっています。そういう状況ですので、この比というのは、実は宇宙が膨張していく間、ほとんど変わりません。

この比を横軸にとって、縦軸に宇宙の膨張して冷えていく間にヘリウムだとか、重水素といわれる物質が生成される割合を計算したものです。ヘリウムというのは、陽子が2つと中性子が2つ、2つずつくっついて非常に安定なやつで、宇宙の中の4分の1ぐらいの量がヘリウムになっているということです。

残りはほとんど水素のままで、太陽などが燃えていくのは、水素が基本的にはヘリウムに変わっていく過程を見ているわけです。そのヘリウムができていく過程で、燃え残りみたいな形で重水素と（重水素というのは、陽子と中性子が1つずつ結びついたもの）ほかにも残ってくるものがあります。これらが観測とうまく合っているということです。

この比の値が、10のマイナス9乗、つまり、0.の下にゼロが8つ並ぶんですね。そういう小さな値で、この比が小さいというのは何をいっているのかということ、実はほと

んどが光であったと、物質の量は、ほんのわずかであると、そういうふうにしてやると、今の観測されている元素の割合を説明することができるということが分かってきました。(スライド 18)

この比の量が決まりますと、物質の量から光子、光の量を推測してやることができます。物質が、この宇宙の中にどれぐらいあるかというのは、銀河を見たりとか、星を見たりとか、そういうことから非常に昔から、おおよそですが分かっていたわけです。

そこから、この比が分かると、光がどれぐらい我々の宇宙に満ちているかということが分かるわけです。その満ちている量からマイクロ波で宇宙を満たしているような光が存在しているということが予言された。

これは、ついに僕が生まれる前ですが、ペンジアスとウィルソンによって 1965 年発見されました。これが本当に宇宙の初期の元素合成のころにあった宇宙を満たしている光子、これが直接やってきたものであるのかどうかということに関して、決定的な結論を与えたのは COBE 衛星、衛星ということは、地球の外に飛び出して、これを精密に観測したわけです。COBE 衛星は絶対温度で 2.725 度で宇宙のあらゆる方向から、こういう光がやってきているということを見つけたわけです。

あらゆる方向から同じようにやってきているんですけども、実は非常に小さい 0.001% ぐらいのゆらぎというのがある。これは COBE 衛星が描いたマイクロ波宇宙の背景放射の強さ、あるいは、温度のゆらぎといってもいいですが、そのゆらぎを非常に強調したマップです。(スライド 19) これで、全天です。空を見て、いろんな方向を普通の地図のように平面に投影した図ですが、場所によっては熱かったり、場所によったら冷たかったり。これは非常に何度も強調しますが、強調して、これを描いているので、ほとんど一様な放射があらゆる方向からやってきているけれど、そのわずかな違いを強調して描くと、こんなふうに見えるということです。

さらにすごかったのは、このスペクトルという、どういう波長、どういう振動数、あるいは、どういうエネルギーを持った光が、どういう割合で来ているかというプロットがあるんですけど、この線を描いてあるのが理論的な曲線です。これは何のことはなくて、ある温度を与えられたときの温度で平衡になっている、平衡になっているというのは、つまり、

マイクロ波宇宙背景輻射

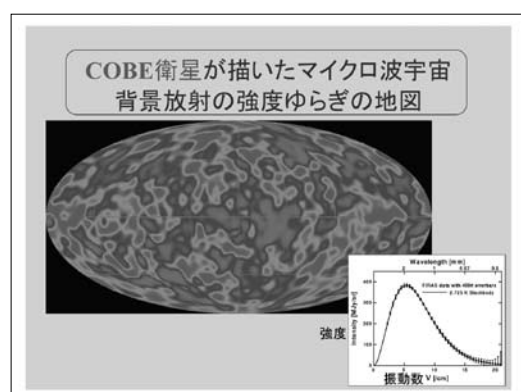
・比が決まると、物質の量から光子の量が決まる
⇒マイクロ波宇宙背景放射の予言

●ペンジアス&ウィルソンによる発見 (1965年)

●COBE衛星(1992年)
◦絶対温度 2.725 度
◦0.001%のゆらぎ



(スライド 18)



(スライド 19)

いろいろな散乱をして、十分に時間がたった後に、どうなっていますかということを見たときに表れる分布です。

これはプランク分布といわれていますが、それに対して非常にピッタリと観測が合っています。ここにちょっとちっちゃすぎましたが、こういうふうにエラーバーがついているんですけども、エラーバーは400倍に強調して描いてあるんで、ほんとは非常に小さなエラーバーで、ピッタリ合っているということを意味しています。(スライド 20)

ビッグバン宇宙論というのは非常にうまく行っていて、十分証拠がある。ただ、ビッグバンが起こる前は、なかなか直接には見えない。直接に見えないので、これをどうやって探るのかということなんですが、この見えない世界をどうやって探るかというのが次の話になります。(スライド 21,22)

ビッグバン宇宙論は成功したわけですが、繰り返しますが、宇宙は高温高密度の火の玉からはじまったと考えると、現在の宇宙が膨張しているということが自然に説明されて、しかも、軽い元素の合成がうまく説明されて、さらにマイクロ波宇宙背景放射というのが予言されて、それが予言どおり見つかったということで、非常に大成功を収めたわけです。(スライド 23)

このビッグバン宇宙論というのは一般相対論から予測された宇宙像なんですが、一般相対論という理論は今や十分な証拠があると考えられています。それでは、その理論の力で、さらに見えない過去を探りましょうというわけです。

ここでインフレーション宇宙というのが仮説として提案されたのですが、これが提案されたのは1980年初頭ぐらいなんですけれども、その後、その研究が進み、いろいろな予測がされて、それが現在、観測的にも検証されようとして

更に、時間をさかのぼる

- ビッグバン宇宙論: 十分な証拠がある
- ビッグバンが起こる前の宇宙:
「直接には見えない」

どうやって探るのか?

(スライド 20)

見える世界のその先

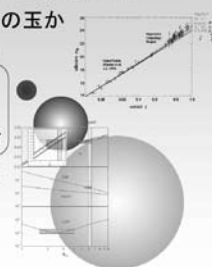
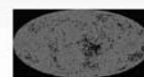
インフレーション宇宙

(スライド 21)

ビッグバン宇宙論の成功

宇宙が高温高密度の火の玉からはじまったと考えると、

- 膨張宇宙
- 軽い元素の合成
- マイクロ波宇宙背景放射
が自然に説明される



(スライド 22)

更に、時間をさかのぼるには

- ビッグバン宇宙論:
一般相対論から予測された宇宙像
今や十分な証拠がある
- 理論の力でさらに見えない過去を探る
- インフレーション宇宙:

仮説 ⇨ 検証

(スライド 23)

いる、ほとんど検証されたといってよい状況にあります。その話をこれからしたいと思います。(スライド 24)

なぜそういう見えないところの予言ができたのかということなのですが、ビッグバン宇宙論の限界として、この高温高密度の火の玉から生まれた。じゃ、その前はどうなっているのかということなんですけれども、そのときに新たな手がかりとして出てきたのが、宇宙論的諸問題といわれる地平線問題だとか、平坦性問題とかであって、そのほかにもいろいろありますが、代表的にはこの2つ。これをちょっと説明したいと思います。(スライド 25)

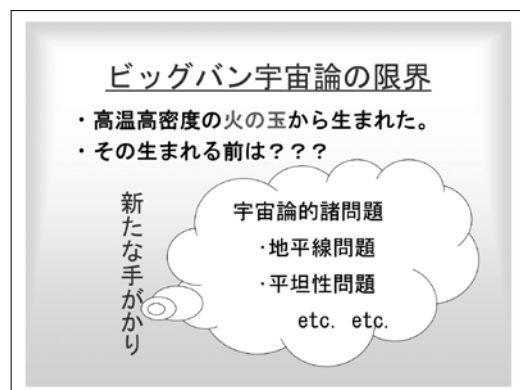
地平線問題というのは、ちょっとこれ見慣れない図かもしれないですけども、いや、見慣れないでしょうね。縦軸が時間です。横軸は空間方向を表します。このラインが現在の時刻を表します。

ある時刻までさかのぼると、宇宙背景放射が生成された面というのがあって、最終散乱面といっています、ある時刻一定面のあたりで宇宙背景放射と我々っているものが生成されました。

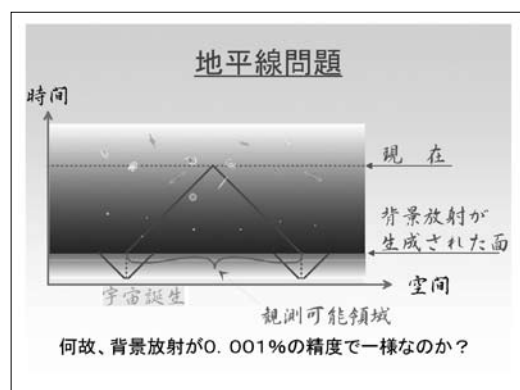
なぜ、そういうことになるかということ、よりさかのぼると密度が高くなりすぎて、ちょっと乱暴ですが、光が我々のところに直接やってこられなくなります。どんどん光が散乱されるので、この先は曇りガラスの向こうのようになって見えなくなる。だから、見えていところのギリギリのところというのが、時刻一定の面として表れます。

こういう時空の図を描くわけですが、光の速度は有限だと言いました。だから、我々のこの現在の位置から、過去に向かってこうやってさかのぼっていくと、我々が見ているのは実は、この交わった点なんですね。ここでどういう温度ですかというのを見ている。あるいは、別の方向を見たときには、別の方向で交わった点での温度がどういう温度になっているかということを見ている。したがって、観測可能な領域の広さというのは、こういうふうに広がっているというわけです。

ただし、ビッグバン宇宙論を普通に考えると、この時間は実は、無限の過去まで伸びているわけじゃなくて、有限のところ密度が無限大に発散してしまいます。この先は、だから、物理の法則が適用できないようなところになってしまう。ここから宇宙がはじまったんだと考えると、何やら我々が見ているこの点とこの点というのは、宇宙が生まれてから一度もお互いにコミュニケーションしたことがない。にもかかわらず我々が見ている空



(スライド 24)



(スライド 25)

は、非常に一様である。ちょっとおかしいんじゃないかという疑問がわいてくる。これが地平線問題です。疑問に思わないかもしれないですが、疑問に思ったわけです。(スライド 26)

さらに、平坦性問題。曲がった空間というのを考えることができます。一番考えやすいのは球面です。球面というのは、曲率(曲がりの割合)が正の空間です。それに対して、こういう馬てい形、馬のくら型、こういう曲面というのは曲率が負で

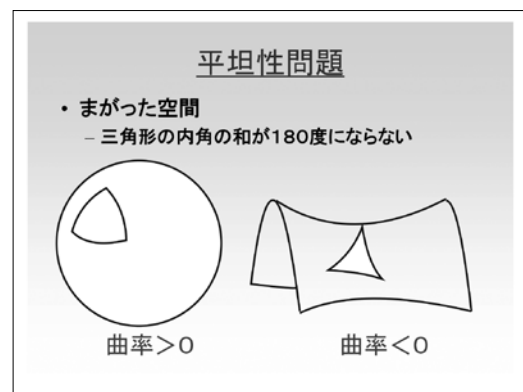
あると言います。一番分かりやすいか、分かりにくいかわかりませんが、この上に三角形を描いてやる。この線は真っすぐに引いたつもりだったわけです。球面の上では、ここの角度を測ってやると、三角形の内角の和は180度より大きくなってしまいます。極端な例は、この北極のところからずっと赤道まで行って、赤道に沿って90度曲がって、また戻ると、ここの角度は全部90度90度90度になります。だから、内角の和は270度ということになって、180度より圧倒的に大きいですね。そういうことです。

一方、この逆の方にとすると、想像しがたいかもしれないですけども、逆の方なので、逆だろうとすぐに納得してもらえばいいんですが、曲率が負になっている。こういう時空が曲がるということを見ると、曲率が正の空間だとか、負の空間というのを考えることができるわけです。(スライド 27)

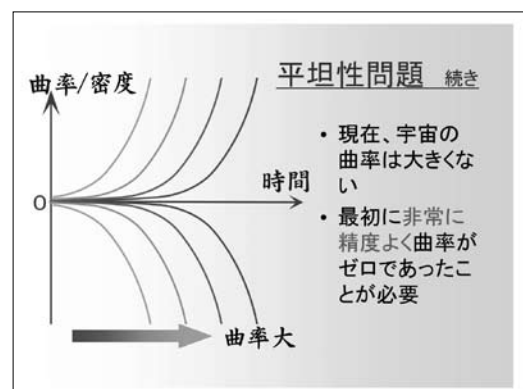
これは何が問題かといいますと、一般相対論に従って、密度に対する曲率の比、この比を時間発展させてやる。そうすると、最初にこの比が非常に小さくても、時間がたつと、密度のほうが多く小さくなる。曲率も膨らむと、小さくなるわけですけども、密度のほうが多く小さくなるので、時間がたつと、この比はどんどん、どんどん大きくなっていくんです。

ところが、実際に現在の宇宙を見ると、現在の宇宙では、我々は空間の曲がりをはほとんど感じないんです。なので、曲率が非常に大きいということは、観測と矛盾するわけです。そうすると、現在の時刻で適当なところからスタートして、過去にさかのぼっていくと、それはとてつもなく宇宙の初期の曲率が小さくなければならないということになるわけです。すると、非常に精度よく初期条件を調整してやらないといけないという問題が生じてくるわけです。この平坦性問題も調整されていたんだったらいいんじゃないのといえ、そうかもしれないんですが、それはちょっと不自然なわけです。(スライド 28)

それで、いろんな人が、これに関与しているんですが、日本ではその当時京都大学にお



(スライド 26)



(スライド 27)

られた佐藤勝彦さんが言い始めた、初期宇宙では真空のエネルギーというものが卓越していたと考えると、すべてつじつまが合うだろうというわけです。先ほど説明しましたように、時間があって、我々の現在の宇宙では宇宙は膨張していますから、膨張に伴って、物質のエネルギーというのは、どんどん、どんどん薄まっていつているわけです。

だから、縦軸はエネルギーです。エネルギーは、どんどん時間がたつと下がっていつているわけです。過去にさかのぼると、これはどんどん、どんどん上がっていくわけです。増えていきます。

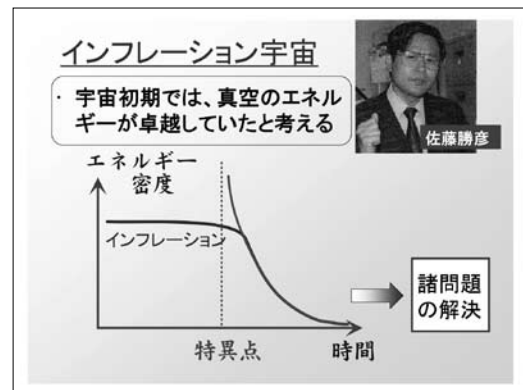
そうすると、こういう特異点といわれるエネルギーが発散する点、エネルギー密度が発散する点が現れます。じゃ、それを避ける意味でも、こういうインフレーションといわれる時期、そこではエネルギーの密度は一定であったと、そういう時期があったと考えると、こういう状態から宇宙はじまったと思うと、宇宙の歴史が変更されて、特異点の発生を避けて、時間が過去に向かって延長されるということが起こる。こうやってやると、諸問題が解決されるといったわけです。(スライド 29)

じゃ、この真空のエネルギーとは何ぞやということなんですが、物理でいうところの真空というのは、基本的には何か粒子が粒子と同定できるようなものがポンと励起されていない、そういう状況、それが真空だというわけです。しかし、そうであっても、真空というのは1つではありません。いろいろあります。乱暴な言い方をすると、これは単に層の違いみたいなものと言えます。

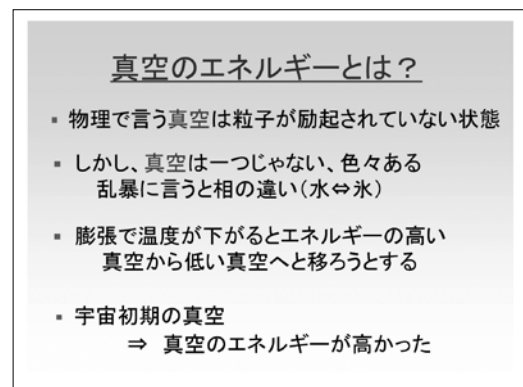
真空というのは、水の話とはちょっと違うんですけども、例えば、水と氷のたとえのような、水の層もあれば、氷の層もある。これは同じ物質でできているんだけど、温度が高いときと低いとき、圧力が高いとき低いとき、そういうので、その層が変わるわけです。こういうのと同じようなことで、真空という、ちょっとつかみどころのないものですけども、時空の空間の状態が変わるといえることが起こり得るというわけです。

基本的には膨張で温度が下がると、エネルギーが高い状態の真空から低い真空に移ろうとする。この氷と水の例えだったら、温度が下がっていくと氷のほうに行こうとするみたいな、そういうことが起こるわけです。

宇宙初期の真空は、こういうふうに考えると、真空のエネルギーは高かったということが予測されるわけです。だから、高い真空のエネルギーを使って、宇宙を膨張させよう



(スライド 28)



(スライド 29)

と。先ほども言いましたように、宇宙の膨張率というのは、宇宙のエネルギーで満たしているエネルギーで決まっているわけですから、エネルギーが高かったら、宇宙は膨張するということになります。(スライド 30)

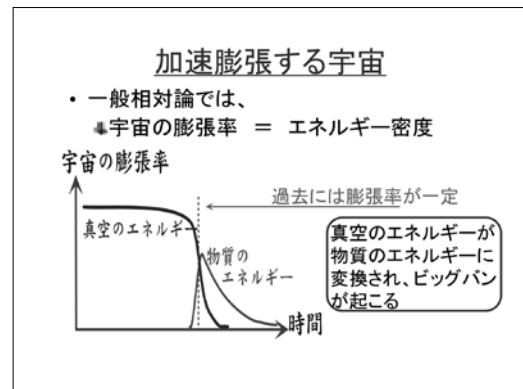
先ほどとほとんど同じ図ですけれども、真空のエネルギーが宇宙を支配している時期があって、この真空が違う相に変わって、真空のエネルギーがほかの物質のエネルギーに転換される。そういうことが起こる。

そうすると、そこで物質が生み出されて、それがビッグバンということになるわけです。真空のエネルギーが物質のエネルギーに変換されて、ビッグバンが起こると、こういう説明です。(スライド 31)

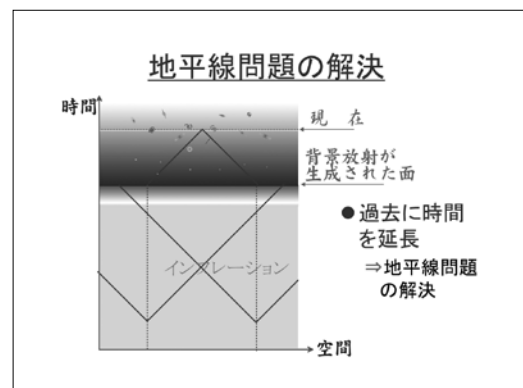
これ、何がうれしいのかということなんですが、まず地平線問題がどういう問題だったかおさらいしましょう。時間が縦軸で、横軸が空間のほうです。ここに宇宙背景放射が生成された面があります。あるところまで温度が高くなると、それより向こうの宇宙は見えなくなるわけですが、そういう面が存在しています。

で、何が問題だったかというと、こちらを見たときと、こちらを見たとき、ここここはお互いが、一度もやりとりしていないんです。そういう遠く離れたところだったのに、何故同じ温度なんだという話だったんですが、インフレーションが起こると、時間が過去に無限に延びるわけですね。なので、幾らでも過去に延ばせられるために、この2つの点はお互いに昔の時期に情報をやりとりすることができたということになります。これが地平線問題の解決ということになるわけです。(スライド 32)

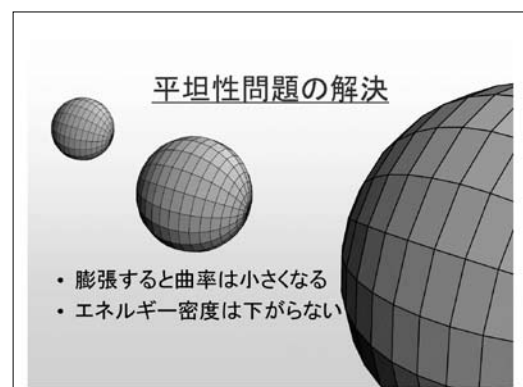
次に、平坦性問題の解決なんですが、先ほどちょっと口で言ってしまいましたが、膨張すると、曲率はどんどん小さくなります。それは、イメージできるかと思います。ちっちゃいボールがあって、膨張していく様を見てみると、曲がり具合が小さくなっていきます。普通は膨張していくと、エネルギー密度も、どんどん下がっていくわけですが、先ほどいいましたように真空のエネルギーというのは、相が持っているエネルギーなので、



(スライド 30)



(スライド 31)



(スライド 32)

宇宙が膨張しても、その相にずっといる限り、エネルギー密度は下がらないということになります。ちょっと詭弁で、質問されたら、また別の説明をしますが、それもあまり納得いかないかと思いますが、そういうことです。(スライド 33)

さらにボーナスがあります。インフレーションというのは、宇宙の構造をつくることもやります。どういうことかという、インフレーション中の量子ゆらぎ、量子ゆらぎというのは、説明し出す

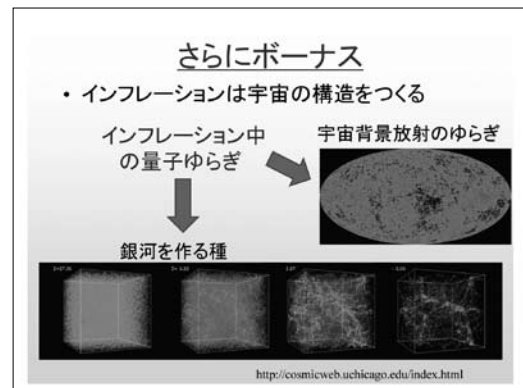
と、また長い話なんですけれども、まず世界を記述しているいろいろな理論、枠組みがあるわけですが、その1つとして量子力学というのがあります。

これは、また 20 世紀初頭に進展した理論の枠組みなわけですが、現在もその枠組みの延長線上に物理学というのは発展してきているわけですが、この量子力学という枠組みでは、あらゆるものにゆらぎが存在している。あらゆるものを確定的に決定することができない。たとえエネルギーが最低の状態にあったとしても、そのエネルギーの最低の状態ですら、少し何か振動しているという、そういう描像を与える理論です。

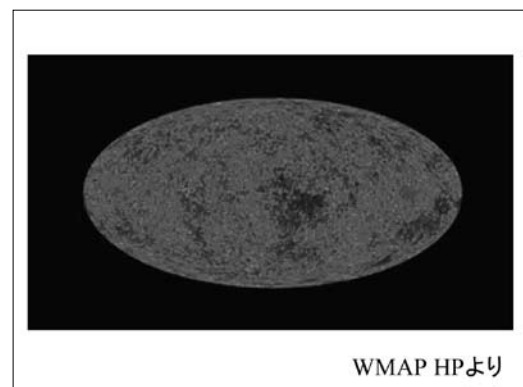
で、面白いことに、このインフレーションを起こしている膨張宇宙の中で、量子力学的なゆらぎというのを成長させてやると、勝手にそれが非常に大きなゆらぎに成長していくということが理論的に予測されます。これに関する最初の研究というのは、このインフレーションが提唱されて、間もない頃になされているわけなんですけれども、それをもとにすると、この宇宙背景放射のゆらぎというのを見事に説明することができるということが分かります。(スライド 34)

これは、先ほども言いましたように、非常にコントラストを高めて、強調して描いた図なわけですが、だから、最初は非常に小さなゆらぎしかなかったわけなんですけれども、それに重力がはたらいているので、小さなムラがあると、密度の高いところがお互い引き合って、逆に密度の薄いところは反発し合うという力がはたらきますので、そういうのを重力不安定性といいます。重力不安定性によって、最初の宇宙のはじめの小さなゆらぎというのがどんどん成長していったと考えられています。

次に、この先ほどのWMAPという衛星のところにあるムービーがあるので、ちょっと。こういう、ここにムラムラとあるわけですが、最初はほとんど一様です。それが何となく時間がたっていくと、何か見えてきます。こういう重力の不安定性によって構造ができて、



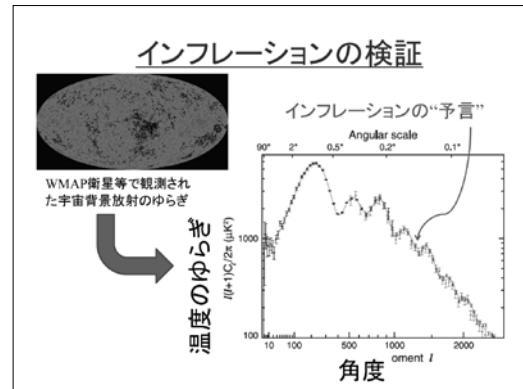
(スライド 33)



(スライド 34)

最初の星が光り始めて、どんどん星が形成されて、見てみると、銀河らしきものが生まれていっている。こういう描像が得られるというわけです。(スライド 35)

インフレーションというものの検証として、よく使われるプロットが、こういうのですが、例えば、WMAP 衛星とかで、こういう地図が得られるわけです。この温度のゆらぎが初期にどうなっていたのか。これをこういうプロットにします。



(スライド 35)

横軸は角度です。角度ですが、右に行くほどどんどん細くなっていっている。左側が粗い。縦軸が温度のゆらぎの振幅です。どういう角度スケールに、どれぐらいのゆらぎがあるか、それをプロットしてやると、こういうふうになる。この点々となっているものが観測ですが、ここに線が引かれています。この線がインフレーションをもとにした密度のゆらぎの生成、温度のゆらぎの生成の予言です。この予言に非常にピッタリと合っているということが分かってきました。

ということで、現在もこの宇宙のはじまりの探究は進行中ということで、きょうは、ここまでで話を終わりたいと思います。ありがとうございます。(拍手)