

フロンティアセミナー 2009:

宇宙論入門

講演者: 佐藤勝彦

書記: 谷川享行, 佐々木 洋平

2010年6月1日

目次

1	宇宙論とは	2
2	相対論的宇宙論	4
3	ビッグバン宇宙モデル	7
4	統一理論と宇宙の創生	10
5	暗黒物質, 暗黒エネルギー問題	18
6	ブレーン宇宙	21
7	人間原理, 宇宙の未来	23
8	相対性理論とタイムマシン	26

1 宇宙論とは

人類には歴史が始まった頃から、素直な疑問として

- 世界の果てはどうなっているのか
- 世界の始まりはどうなっているのか

という問いかけが神話、哲学の課題としてあった。

古代の宇宙論

インド: 象蛇

エジプト: 太陽神が毎日ナイルを渡る

エッダ (Edda)

アイスランドバイキングの伝説. 宇宙の始まりが書いてある.

時の始まった時には、何もなかった。砂も海もまた冷たい波もなかった。地は見当たらず、上に空もなく大きな口を開けた裂け目があったが、どこにも草木はなかった。

わずか 30 万人の国でも宇宙の始まりを考えていた。

シヴァ神 (宇宙破壊神)

右足で立ち左足を上げたダンスで、宇宙を創生（ブラフマー）、維持（ヴィシュヌ）、破壊（シヴァ）。

現在の宇宙像 宇宙論的スケールでは銀河が構成要素

- 我々の銀河＝天の川銀河は、大マゼラン雲・小マゼラン雲を伴い、アンドロメダ銀河（230 万年光年）と双子の関係。
- 太陽系 < 天の川銀河 < 銀河集団、
- 全天銀河サーベイの結果
 - － 蜂の巣の様な格子構造が見える。
 - － ボイドと呼ばれる空隙

Q. 色はなにか？

A. 失念した。恐らく銀河数密度ではないか。

宇宙の創生 アインシュタインの言葉:

- 「私は神がどのような原理に基づいてこの世界を創造したのか知りたい。その

ほかのことは小さなことだ。」

- 「私のもっとも興味を持っていることは、神が宇宙を創造したとき、選択の余地があったかどうかである。」

アインシュタインの一般相対論が基礎に、これらの疑問に科学の言葉で答えることのできる時代になった。

Q. アインシュタインの頃の宇宙像は

A. 当時は天の河銀河しか認識されていなかった。膨張宇宙論も知らなかっただろう。

2 相対論的宇宙論

宇宙原理 宇宙は一様, 等方

- 宇宙には凸凹はあるが大きなスケールでは均して一様と考える
- 宇宙には特別な方向は存在せず、あらゆる方向は平等

計量テンソル $g_{ij}(x)$ の型が簡単になる

アインシュタイン方程式:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

左辺が時間・空間の幾何学を決める量. 右辺が物質の存在を決める量.

計量テンソル (復習)

$$ds^2 = g_{ij} dx^i dx^j$$

2点間の「距離」を表現する式

2次元ユークリッド空間の場合 $ds^2 = dx^2 + dy^2 = g_{ij}(x)dx^i dx^j$

$$g_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

2次元極座標の場合 $ds^2 = a^2 d\theta^2 + a^2 \sin^2 \theta d\phi^2 = g_{ij}(x)dx^i dx^j$

$$g_{ij} = \begin{pmatrix} a^2 & 0 \\ 0 & a^2 \sin^2 \theta \end{pmatrix}$$

アインシュタインの静止宇宙モデル (1917)

曲率が正, 閉じた宇宙モデル.

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R}_{\text{時間空間の幾何学を表す量}} = \underbrace{\frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}}_{\text{万有引力を表す量}} - \underbrace{\Lambda g_{\mu\nu}}_{\text{宇宙定数}}$$

- 元は万有引力の法則なので、放っておくと自己重力で宇宙は潰れる. 斥力項が必要なので加えたのが「宇宙項 Λ 」
 - アインシュタインは宇宙は永遠不変だと確信。ゆえに、宇宙定数（宇宙斥力：空間が互いに押し合う）を導入して、万有引力と釣り合わせ、静的モデルを作った。

- 4次元のユークリッド空間に埋め込まれた4次元球の表面(3次元)。次元を一つ下げれば地球の表面のようなもの。
- 曲率が正。閉じた(有限の)宇宙モデル。どこまで行っても果てのない宇宙。トポロジー的にはS³。

アインシュタイン方程式の変形 宇宙原理に従ってアインシュタイン方程式を変形すると一様密度の球の半径の時間発展

$$\underbrace{\frac{\dot{a}^2}{2}}_{\text{運動エネルギー}} + \underbrace{V(a)}_{\text{ポテンシャルエネルギー}} = \underbrace{-\frac{k}{2}c^2}_{\text{全エネルギー}} \quad (2.1)$$

$$V(a) = -\frac{GM}{a} - \frac{\Lambda}{6}a^2, \quad M \equiv \frac{4\pi}{3}a^3\rho \quad (2.2)$$

a は宇宙のスケールファクター。半径 a のガス球

k は宇宙の曲率の符号¹。静止宇宙 ($\dot{a} = 0$) は非常に不安定。揺らぎによって、潰れるか急激な加速膨張。

フリードマン宇宙モデル 宇宙原理に基づき、宇宙項の存在しない場合のアインシュタイン方程式を解く。 $k = 1, 0, -1$ の場合を含めて会を求めた。

$$\frac{1}{2}\dot{a}^2 - G\frac{4\pi a^3}{3}\frac{\rho}{a} = -\frac{k}{2}c^2$$

$k = 1, 0, -1$ の場合について解くと $k > 0$ ならば、やがて収縮し、 $k < -1$ ならば永遠に膨張する。

ハッブル定数

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$$

減速パラメータ

$$q(t) = -\frac{\ddot{a}(t)a(t)}{a\dot{a}(t)}$$

減速パラメータ q が観測できると曲率 k がわかる.. 曲率 k は密度からもわかる。

密度

$$\rho_c = \frac{3H^2(t)}{8\pi G}$$

¹ スライド中の R は a の誤植

密度パラメータ

$$\Omega(t) = \frac{\rho_0}{\rho_c}$$

密度パラメータが > 1 なら曲率は正. ハッブル定数と減速パラメータがわかれば, 宇宙の年齢もわかる宇宙の大きさの一階微分, 二階微分がわかるようなモノ
赤方偏移 宇宙が膨張した分だけ波長が引き伸ばされる.

$$1 + z \equiv \frac{\lambda_0}{\lambda_1}$$

アインシュタインのフリードマン論文審査

アインシュタインはフリードマンの論文のレフェリーだった! リジェクトされた.

「フリードマンの結果は疑わしい. 計算しなおしてみると, 静的モデルになった。」

G, ルメートルも膨張宇宙モデルを発表

「あなたの計算は正しいが, 物理のセンスは疑わしい」

膨張宇宙の発見 E. Hubble, 1929

- ハッブルの法則:遠くにある銀河ほど, 高速度で遠ざかっている.
- ウィルソン天文台での観測. 世界観が変わるような発見.

Q. どうやって観測したのか?

A. どこかの波長線を使用してドップラーシフトを測定した. ドップラーシフト自体は難しくない. 距離を決めるのが難しい.

「宇宙定数の導入」について アインシュタイン曰く

「宇宙定数の導入は人生最大の失敗だった」

インフレーションは真空のエネルギーに対する斥力によるが, 真空のエネルギーは宇宙項に対応する. ドップラー効果を用いた後退速度の決定

$$z \equiv \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

ハッブルの法則 当時観測から求められたハッブル定数は

$$H_0 = 558 \text{ km/sec/Mpc}$$

現在の 7~8 倍. セファイド以外のデータも混ぜていたため.

3 ビッグバン宇宙モデル

これまでの宇宙モデルでは「温度」を考えていない

ビッグバン宇宙モデルの成立 ガモフ (1946):

元素合成の立場から「初期宇宙は熱い火の玉から始まらなければならない」と主張.

宇宙を構成する元素はほとんど水素やヘリウムであり, 重元素は微量. これを説明するためには, 巨大な一個の原子核から始まった宇宙は高温でなければならない.

温度が低いと中性子星がたくさんできて重元素だらけになってしまい, 水素やヘリウムは殆んど合成されない. 現存するくらい水素を残すためには, 高温でなければならない.

ビッグバンで合成される元素は軽元素 (H, D, He, Li) のみ. 他は星の中で合成.

宇宙マイクロ波背景放射の発見 ベンジャス, ウィルソン (1965):

宇宙が熱い火の玉として始まった証拠

ビッグバン宇宙の温度

$$\frac{1}{2}\dot{a}^2 - G\frac{(4\pi a^3/3)\rho}{a} = -\frac{k}{2}c^2$$

宇宙初期はポテンシャルの谷底なので, 曲率はどうでも良い ($k = 0$). 構成物質として, 原子とかニュートリノとか考えると

$$\rho = g\frac{\pi^2}{30}T^4$$

これから温度の時間変化を決める式が求められる. 宇宙の温度は

$$T(\text{MeV}) \sim (t(\text{sec}))^{-1/2}$$

宇宙初期は 100 億度.

ヘリウム合成 ● 宇宙のスケール項

$$a(t) \propto t^{1/2}$$

● 宇宙の温度変化

$$T(\text{MeV}) \approx (t(\text{sec}))^{-1/2}$$

- 初期宇宙の元素合成では宇宙膨張が早いので, D, ^3He が飽和せず Li, Be 等の材料に使われていく. ビッグバン元素合成とバリオン密度
 - 小文字の h : ハッブル定数を 100km で規格化
 - バリオン: 陽子, 電子, 中性子などの総称観測と合うように Ω_b を定めると

$$\Omega_b h^2 = 0.01 \sim 0.02$$

- 2つの元素合成理論の比較 (ビッグバン元素合成・星元素合成)
- 場所, 時間スケール, 温度, 密度, フォトンバリオン比, 生成元素
- $\alpha\beta\gamma$ 論文, 著者の並びが A, B, G. 出たのが April fool.
- ヘリウムの存在量
- 林忠四郎と中性子陽子比 (1950)
- ビッグバン元素合成
 - 宇宙誕生最初の 3 分間
 - * 重水素合成が第 1 ステップ.
 - * 一旦重水素ができると, 2 体反応の積み重ねで直ちにヘリウムが合成
 - ・ $p + n \rightarrow pn, pn + n \rightarrow nnp, nnp + p \rightarrow \text{He}$
 - ・ $p + n \rightarrow pn, pn + p \rightarrow npp, npp + n \rightarrow \text{He}$
 - * ただし, 質量数 5, 8 を持つ安定な原子なし → それ以上の重元素合成は起こらない.
- 初期宇宙の軽元素量進化
 - 図: 軽元素の存在量 vs 時間
 - ヘリウムの質量存在比 25% が自然に説明される
- ビッグバン元素合成とバリオン密度
 - 図: 元素存在比 vs 宇宙のバリオン質量密度
 - ビッグバン元素合成理論が宇宙のバリオン質量密度の関数として予言. 観測と比較的よく一致.

マイクロ波背景放射

- 宇宙開闢 1 秒の頃の「晴れ上がり」からの放射.
温度が高いと電離度が高いため Thomson 散乱で光子はまっすぐに進めない (電子が光子を散乱する). ある程度冷えて (4000 K ~ 5000 K) 原子が電子を掴まえると, プロトンを散乱しなくなる. よって, 遠くを見ればトムソン散乱が効かなくなって, 光子がまっすぐ進めるようになった時代を見ることになる.
- アルファー, ハーマンが存在を予言. → ベル研究所のペンジラスとウィルソン

が観測予言されたのは 5K, 初期の観測では 3.5 K. 現在は 2.7 K

- CMB は完全な黒体放射. 10^{-4} の精度でプランク分布と一致する.

4 統一理論と宇宙の創生

ルメートル宇宙モデル

宇宙定数入りのフリードマン宇宙モデルの解

$$\frac{\dot{a}^2}{2} + V(a) = -\frac{k}{2}c^2$$

$$V(a) = -\frac{GM}{a} - \frac{\Lambda}{6}a^2$$

$$M = \frac{4\pi}{3}\rho a^3$$

フリードマン宇宙と同様に、宇宙の大きさゼロから出発するが、ポテンシャルの山を越えれば急激に膨張するモデル。

現在の宇宙のエネルギー密度 = 暗黒物質 + 宇宙定数 (真空のエネルギー)

ここで宇宙定数は

$$\Lambda = 8\pi G/c^4 \rho_v$$

と書き換えられる。 ρ_v が真空のエネルギー。実は Ω_0 はダークマターとバリオンからなっている。

宇宙の創生 ビッグバン理論は大成功!

- アインシュタインの相対性理論に基づく (フリードマンモデル)
- ハッブルによる宇宙膨張の発見
- ガモフのビッグバン (火の玉モデル) による元素の起源
- 火の玉の証拠としての宇宙背景放射
- 現在の豊かな宇宙構造: ガスが冷却して固って形成されることで説明できそう
これでもうまくいきそうだけれども、気になるところもある。
- ビッグバン宇宙の「始まり」は物理が破綻している時空の「特異点」
- なぜ火の玉として始まるのか
- 現在の宇宙構造の起源を説明できない:
→ 蜂の巣構造は密度のゆらぎが必要であるが大構造を火の玉スケールにもどると、端から端まで光で連絡できないほど長い距離。よって因果関係で説明でき

ない (因果律が存在できない) ことになり, 最初から大構造は織り込まれていたことになる.

- 一様性問題: 因果律的に連絡できないところで, 同じ温度, 密度になるのはおかしいのではないか?
- 平坦性問題: 現在の曲率はほとんど 0. 宇宙を平坦なまま膨張させるのは, 初期において極めて厳しい微調整が必要 (Robert Dicke 1916-1997). 曲率が少しでも正なら宇宙はすぐ潰れる. 少しでも負なら早く膨張するため, ガスが固まる時間がなく, 星と銀河が作られない.

これらの困難・問題を解決するために, インフレーション理論, 量子論的創生が考えられた.

インフレーション宇宙論

宇宙の始まりに発生した指数関数的な宇宙の膨張. 量子宇宙論: “無” からの創生. 宇宙という最も大きな存在の起源を研究するためには逆に最も小さい極限である素粒子の法則が必要. 未完の「力の統一理論」が宇宙創造の鍵. 力の統一理論が宇宙の初期にどう適用できるかを考えた.

- 力の統一理論: アイシュタインの夢
重力, 電磁気流, 弱い力, 強い力をひとつの力に統一する.
- 物理法則の統一法則
物理学の真髄: 自然世界のあらゆる現象をできるだけ簡単な, 少ない法則で説明する. 物理学の歴史は統一理論の歴史とも言える.
 - 重力: 林檎の落下と天体のあいだに働く力をニュートンは統一
 - 電磁気: 磁石の力と電気の力を Maxwell は統一
- アイシュタインの夢: 統一理論 (1932) 重力と電磁気力の統一. 統一されるのは電磁気力と弱い力. しかし, 時期早尚であった.
 - 弱い力
 β 崩壊を引き起こす力例: 中性子の β 崩壊など. W^+ , W^- , Z ボソン が媒介. ニュートリノは弱い力と重力しか働かない.
 - 強い力
核子の間に働き, 結合して原子核を作る力 (湯川中間子理論). 現代的には, quark と quark を結びつける力は色の力.
- ワインバーグ・サラム理論 (1967): 第一段階の統一理論. 電磁気と弱い力は統一され「電弱力」と呼ばれる. 実験的な裏付けもある.

- 大統一理論 (GUTs): 電弱力と色の力の統一理論しかし実験的な裏付けがない。陽子崩壊が観測できないと駄目。スーパーカミオカンデで陽子崩壊検出できず。陽子の寿命は 10^{34} 年以上。

WS 理論と真空の相転移

力の統一理論は宇宙初期は真空のエネルギーで見ちていることを示唆している。真空も物理的実態, エネルギーの順位が最も低い, ground state と捉える。

- 真空が相転移して 2 つの力に分かれ, 等方な状態から秩序がある状態に変わった。
- 真空が相転移するとはどういうことか?
真空のエネルギーで満ちている。素粒子がペアで生まれたり消滅したりを繰り返している (真空の 0 点振動)。真空は何も無いのではなく, ground state である。
- ワインバーグ・サラム理論は南部陽一郎の真空の自発的対称性の破れの理論に基づく。
- 統一理論は超伝導理論のアナロジーとも言える。超伝導はスピンのバラバラだったのがそろって相転移 (ギンツブルグ・ランダウ理論)

真空の自発的対称性の破れにより, もともと質量ゼロだった, W,Z ボソンが大きな質量を持つようになる。W,Z ボソンの質量はおよそ 100GeV になり, 力のレンジが短くなり, 弱くなる。媒介する光子が重くなる, という表現をすることがある。

- ヒッグス粒子: 真空の地図を記述した場
- 自発的対称性の破れ: 物理法則は厳密に対称。しかし対称な状態は不安定で, 対称性は結局破れる

Q: 力のレンジと質量の関係は?

A: おおざっぱに言うとコンプトン波長 h/mc 。質量ゼロだと距離無限大。

質量階層問題

素粒子にはなぜ質量の階層構造があるのか? ヒッグス場は粒子と相互作用し粒子の質量を変えるビッグバン, インフレーションの際に, 一つの力から重力, 色の力, 弱い力, 電磁気力, と分かれていったと想像される。

- LHC(スイスにある加速器): ヒッグス粒子の発見を目指す。

真空の相転移 真空の相転移から予言される観測可能な量は存在するか?

- 困った事に, 色の力と電弱力が分かれる相転移 (大統一理論の相転移) を考える

と磁気単極子 (モノポール) ができることになってしまう。対称性が破れたとき、各場所で色々な種類の真空に分かれて良い。真空の相転移が進んだ部分同士がぶつかったところでモノポールが確率的に作られる。計算すると 100 個の陽子中性子につき 1 つのモノポールが作られるはず。

- 真空の相転移は過冷却のような 1 次の相転移である可能性がある。真空のエネルギーで満ちていた。真空のエネルギーは宇宙定数と同じ役割を果たしており、斥力が働く。この斥力によって加速度的膨張空間は倍々ゲームで拡がるんだそう。真空のエネルギーが相転移終了後に熱エネルギーに変わる。真空のエネルギーは薄まらない (密度は一定)。斥力は、重力である。なぜなら

$$\Lambda = 8\pi G/c^4 \rho_v$$

で G が入っている。

$$(\dot{R}R)^2 = 8\pi G\rho_v/3$$

よって $R \sim \exp t/l$ 。

- 急激な膨張でモノポールは宇宙の彼方に追いやられる。インフレーションの間にバリオンがたくさん作られる。これだとモノポールができて存在することになる。Maxwell 方程式で $\nabla \cdot B = 0$ になっているのは観測でモノポールが見つからないからに過ぎない。モノポールまで考慮するなら、Maxwell 方程式を変えないといけない。
 - Q. マクスウェル方程式からは、電荷と磁荷はモノポールがあるかないかだけの違いだが、その起源は?
 - A. 色の力と電弱理論の分岐の時のトポロジカルな欠損から磁荷が自然に発生してしまう (?). 電荷はその前からある。

インフレーションは魔法のメカニズム?

真空のエネルギー密度は、相転移が起こるまで一定。宇宙が膨張してもエネルギー密度は薄まらない。空間が広がるほど内部エネルギーが大きくなる負の圧力を持つ物質を考えることに相当する。これは状態方程式が

$$p = -\rho c^2$$

となる流体に相当する。真空のエネルギーに斥力がはたらき、宇宙を急膨張させる。これだとエネルギーは保存。あたかも、ただで宇宙の物質エネルギーを創っているように見える。膨らんだ分だけエネルギーが増える。エネルギーを与えたのは引き

延ばした力, すなわち重力に他ならない. 位置エネルギーがものすごい負になって見掛けのエネルギーが増えている (落下現象と同じ, ということになる) 急増大した真空のエネルギーが相転移によって熱エネルギーに換わり, 巨大な火の玉宇宙が創生される. クォーク, レプトンが真空のエネルギーにより生成される.

インフレーション理論とその予言

1. 指数関数的な急激な宇宙膨張で地平線問題, 平坦性問題解決

地平線問題

広がる前は因果関係がきちんとあった.

平坦性問題 = 曲率はどうなっているのか?

曲率が殆んど0になるくらい広大になる.

モノポール問題

モノポールはインフレーションによって宇宙の果てに押しやられた.

2. 熱エネルギーの開放によって火の玉を作る
3. 宇宙膨張以前にあった量子揺らぎが引き伸ばされ構造 (銀河, 銀河団など) を生成する種になる.

「完全に平坦にする」「完全にモノポールを無くする」わけではなく, みかけ上認識できないようにして解決する.

宇宙の多重発生

インフレーション期に宇宙が多重発生する (インフレーション開始の時刻が違う). 無限の宇宙 (multiverse) の可能性. 子宇宙はキノコ型ワームホール (アインシュタイン方程式の解の一つ). 元々母宇宙の一部 (子宇宙) が早く膨張し, ワームホールで子宇宙と母宇宙が繋がっている, という描像 (壺中の天... みたいな).

Q: ワインバーグ・サラム理論における相転移でインフレーションは?

A: (あってもよいが) 実験的に否定されている.

インフレーション理論まとめ

1. ビッグバン宇宙 (火の玉宇宙) を作る.
 - (a) 小さな量子宇宙をマクロ宇宙へと膨張させる.
 - (b) 量子揺らぎを引き伸ばし, 宇宙構造の種を仕込み.
 - (c) 真空のエネルギーを熱エネルギーに転換し, 宇宙に物質エネルギーを満

たす。

2. 無限に宇宙を作るメカニズムではない。

電弱統一理論ではバリオンが少ない (陽子と反陽子). ところで, 「母宇宙」はどうやってできるの?

宇宙は無から創生される

Vilenkin, A.(83) の量子重力論. ウィーラ・ドイット方程式 (宇宙のシュレディンガー方程式)

$$\left[\frac{1}{2} \left(-i\hbar \frac{d}{da} \right)^2 + V(a) \right] \phi(a) = 0$$

ポテンシャルの分布として

- 大きくなるほどポテンシャルが低くなる
- 原点 (大きさ 0, エネルギー 0, ただしエネルギー密度はある) が「無の状態」

WKBJ もしくはド・ジッター・スタントン (虚数時間を使う方法) でトンネル効果の確率を求める.

- ド・ジッター・スタントン
 - ド・ジッターは宇宙項のみのアインシュタイン方程式を解き, 収縮・膨張をする宇宙の解を得た
 - スタントンは虚数時間の解を得た
 - これを組みあわせて, 何も無い (虚数時間) 空間から, 膨張する宇宙へ.

量子宇宙論ははじまったばかりで確定理論はない.

観測的うらづけ

遠くを観測することで過去を知る. 電磁波を使うことで腫れ上がりの頃までは遡れる. COBE 衛星の遠赤外線スペクトルによって, 宇宙が埋まれて 30 万年頃の量子揺らぎによる宇宙の種を観測できた. インフレーション宇宙論の証拠となった.

さらに WMAP によって高解像度の観測を行なった. WMAP は L2 ポイントで観測した. COBE よりもさらに細かい. COBE も特徴を捉えていたがより鮮明になった.

Y_m^l で $l \sim 1000$ 程度まで解像. 宇宙年齢も 137 ± 2 億年と決まった.

WMAP の結果のスペクトルと理論的なスペクトルとは素晴らしく一致する. 理論的なスペクトルのパラメータはハッブル定数とダークマターの量. なので, ここまで一致することで, 逆にパラメータが定められる.

定まる宇宙パラメータは,

- ハッブル定数 $H_0 = 73 \pm 3 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
- バリオン密度 $\Omega_b h^2 = 0.02229 \pm 0.00073$

- 暗黒物質とバリオンの合計密度 $\Omega_m = 0.241 \pm 0.034$
- 始めのこぼこスペクトル指数 $ns = 0.958 \pm 0.016$
- 始めのこぼこ度合い $\Omega_8 = 0.761 \pm 0.049$
- 再イオン化までの光学厚み $\tau = 11.0 \pm 2.6$
- 宇宙年齢 137 ± 2 億年

など. WMAP はまだ観測を続けているので, 数字の精度が上がっている. ヨーロッパでも「プランク衛星」を上げるので, さらに精度が向上するだろう.

観測結果が理論に非常に良く一致している. 矛盾が無くてつまらない (?) 理論は観測結果との不一致, 矛盾から発展している

宇宙の構造形成の計算機シミュレーション

WAMP で観測された揺らぎのパターンを初期値として銀河形成の数値シミュレーション. 蜂の巣構造やグレートウォールが形成される. 構造に関して, 相関関数などは観測と非常に良く一致する

計算機シミュレーションでの主な重力源はダークマター. 最近ではバリオンはガスとして, ダークマターは非常に重い粒子として解く. バリオンはダークマターに付随する.

ダークマターが凝集して銀河の「種」ができてその中に天体がある. 大きな構造は後からできる (銀河の衝突) なので, 銀河の種の中で天体ができて, その銀河が凝集して構造ができる.

インフレーションによって量子揺らぎが 100 桁のスケールで引き伸ばされ観測できるようになっている.

宇宙の創生・進化について観測と理論とほぼ完璧に一致. 基本的な進化・構造, 我々の宇宙での位置も理解された.

多様なインフレーション理論

真空の一次相転移によるインフレーションの困難: 大統一理論による理解はできない. SU(5) ゲージ理論の陽子崩壊の寿命 (10^{29} yr) がカミオカンデの観測結果による下限値 (10^{34} yr) と合わない. 観測と合うようにすると, ゲージの自由度が二つ増える. ヒッグス場ではなくて, インフレーションを都合良く発生するなんらかの場 (= インフラトン) での相転移によってインフレーションを引き起こす (インフラトンは一般的な名称であり, ヒッグス場もインフラトンの一部かも).

インフレーションの成績は...

不可 (Peebles, Making Sense of Modern Cosmology, Scientific American, Jan. 2001).

「みごとな理論だが, 直接証拠に欠け, 物理法則を大量に採用しなければ成り立たない」

もの凄い数のインフレーションモデル. どれも証拠が無い. 最近では膜宇宙論が良いかもしれない. しかしながらインフレーション自体は宇宙創生初期段階での重要なプロセス. 未だ大きな謎, 未解決問題がいっぱい

- ダークマター
- ダークエネルギー
- 宇宙創生・初期宇宙

ちなみにダークマターの存在は「B+」. 「A+」でも良いじゃないか...

5 暗黒物質, 暗黒エネルギー問題

ダークマター

宇宙を構成する主要な物質の正体は不明. 本によつては 1 % 程度違う. バリオンは数 % 程度で, ほかは暗黒物質/暗黒エネルギー.

- 通常物質 4%
- 暗黒物質 23 %
- 暗黒エネルギー 73%

暗黒物質の存在

銀河, 銀河団, 超銀河団を内部周辺を覆う, 光らない重力源のこと. 渦巻銀河の回転速度を観測すると, 内側と外側で殆んど変わらない. 中心に物があつて重力と遠心力がつりあう, というバランスではなくて渦巻銀河の暗い所に重力源となる光らない物質が存在している, と考えるとつじつまが合う. 渦巻銀河の観測される表面輝度から予測される回転速度と観測地は, 外縁領域ほど一致しない (観測値は外縁は一定).

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GMm}{r^2} \quad \rightarrow v = \sqrt{\frac{GM}{r}}, \quad v = \text{const} \quad \rightarrow M \propto r$$

円盤半径の 2 倍程度まで, 質量源が存在している.

髪座銀河団の X 線観測では非常に高温なガス分布が見える. これほど高温の銀河を銀河団として維持できる様な重力源が存在する. 星, 星間ガスの質量の 10 倍程度.

これら重力源となる素粒子をダークマターと読んでいます.

- 星間ガス内のダークマターの速度は, ビリアル定理から見積れる. 簡単に言えば銀河の移動速度.
- バリオン 4 %, ダークマター 23 %, なのに銀河団中のダークマターはバリオンの 10 倍の量?
 - 恐らくバリオンが全て見えているわけではない, から.

重力レンズによる観測

COSMOS(Cosmic Evolution Survey). 弱い重力レンズ効果で, 銀河から地球へ向かう光が暗黒物質により湾曲する. 湾曲した銀河の形状から, ダークマターを探す. 三

次元暗黒物質分布地図 (トモグラフィ).

ダークマターの正体

ダークマターはバリオンではない. 宇宙初期においてバリオンの総量は制限される. 初期に元素合成に参加しなかった粒子が候補.

- 質量をもったニュートリノ?
 - スーパーカミオカンデ, WMAP, トリチウムの β 崩壊などから見積ると質量が小さすぎる.
- ニュートラリーノ (WIMP)?
 - Weakly interacting massive particle. 電磁気力と反応しない粒子.
 - * $0.3\text{GeV}/\text{cm}^3$
 - * 260km/s のランダム速度 + 230km/s (太陽系)
 - 観測されない/検出されていない液体キセノン 800kg との相互作用を検出中で, 数年以内にあるかないかは分かる
- Axion?
- 影宇宙?
 - 10次元宇宙に浮かぶ”膜宇宙”
 - 隣の”膜宇宙”の天体が見えない重力源, 暗黒物質の正体?

ダークエネルギー問題

Science の 1998 のトップが真空のエネルギーの発見. これをダークエネルギーと呼んだ. 現在の宇宙も加速度膨張しているので, インフレーションの時に使われた以外のエネルギーによって第 2 のインフレーションが起きたのかも. 遠方の超新星観測から真空のエネルギーの観測が WMAP 衛星も確認した. 現在 SNAP (SuperNove Accerelation Probe) を計画中. アインシュタインの宇宙定数は現在の宇宙で復活した!! . しかしその正体はまったく不明. 何が問題になっているか.

- 小さすぎる問題: ダークエネルギーが存在するならば, 何故こんなに小さいのか. 量子重力効果なら, エネルギーの単位はプランクエネルギーの筈.なのにそれ比して 100 桁小さい (太陽のコンプトン散乱での見積). 現在の真空エネルギー密度とプランクエネルギーの比は

$$\frac{\rho_v}{\rho_{\text{planck}}} = \frac{(10^{-3}\text{eV})^4}{(19^{19}\text{eV})^4} = 10^{-124}$$

- 偶然性問題: なぜ今になって第2のインフレーションが発生するのか (ワインバーグは「人間原理」によって説明).

人間原理 宇宙は無限に存在. それぞれ異なった宇宙定数. 現在の値より大きな値を持つ宇宙では天体の形成が進まず, 知的生命体が生まれえない. 無数の宇宙の中で, 知的生命体が生まれる宇宙のみ認識される. 従って, 人類が生まれるのに適した値に設定されているように認識する.

- 真空のエネルギーの”差”の観測: 値 (データの差) は観測できる. カシミール効果を使用.

エネルギー密度そのもの, 絶対値は不明/測定不能

ダークエネルギーの状態方程式

真空のエネルギーが何らかの実態を持つならば, 物質同じように変化するかもしれない.

$$p = w/\rho$$

- $w = 1/3$ (輻射)
- $w = 1$ (真空)
- $w \leq -1/3$

実体はインフラトン?

一般相対論, 重力則の変更による解決? 宇宙論的な大きなスケールでは重力の法則が異なっているとすればダークエネルギーは不要になる. ルギーは不要になる (理論物理のいい演習問題).

まとめ

アインシュタイン:

深く探求すればするほど, 知らなくてはならないことが見つかる. 人間の命が続く限り常にそうだと私は思う.

6 ブレーン宇宙

宇宙の未来

現在の加速度膨張が続くと、1000 億年後には我々の銀河 (アンドロメダ銀河など、現在の近傍銀河と合体して出来た超銀河) 以外には一切見えなくなる。永遠の存在を許された宇宙だが、消え入るような死に向かう宇宙。1000 億年後、ウィリアムハーシェルの島宇宙 (18 世紀) と同じ宇宙論に帰るのだろうか?

- 背景放射は存在するが、弱すぎる
- He も星の元素合成で十分説明可能に。ビッグバンで作る必然性なくなる。
- 無限の空虚な空間に私たちの超銀河だけで唯一存在する宇宙となる。

宇宙の進化:

- 10^{14} 年後:宇宙は輝きを失う
- 10^{18} 年後:銀河の蒸発 (力学的に散乱)
- 10^{34} 年後:陽子の崩壊 (ブラックホール, 光, ニュートリノ, 電子陽電子に)
- 10^{100} 年後:ブラックホールの蒸発

第 5 の相転移:

このエネルギーは第 1 のインフレーションの様にいつか消えるのだろうか。暗黒エネルギーが相転移で消えるなら、ビッグクランチ (大往生) を迎える可能性?

超ひも理論/ブレーン理論

全てを粒子ではなく、開いたひも (物質), 閉じたひも (重力) で表わす理論。ひもの振動が物質の種類などを表わす。重力を媒介する重力子以外はまくにくっついており離れられない。物質は膜に閉じ込められた世界 (ブレーン世界) に居続け、重力はブレーン世界外に及ぶ。ブレーン理論における膜同士では相互作用しない。ビッグバンは膜同士の衝突で起きた, など。

膜同士の微小距離での重力測定

膜の「厚さ」 λ , 補正のパラメータを α として

$$V = -G \frac{m_1 m_2}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda})$$

微小距離での重力測定を行なう。結果, 少なくとも, 50 ミクロン以下ではニュートンの法則が正しい。LHC でブラックホールが観察できるかもしれない。

- 素粒子と素粒子を正面衝突させ、ブラックホールを作る。

- 東大のグループも実験に参加. ATLAS 測定機.
 - Q. ブラックホールはどうやってできるか?
 - A. 高エネルギーの粒子がシュバルツシルト半径にあればよい.
 - Q. 蒸発は確実か?
 - A. 多くの理論物理学者は確実と考えている. 非常にコンシステントな理論.

余剰次元

余剰次元, 我々の膜の外側はカラビ・ヤオ空間になっている. 超ひも理論は, 物理法則が互いに異なり空間の次元も異なるなど多様な宇宙が無数 (10^{200} !) 存在しうると予言 (仏教の曼荼羅そのものか?).

同一時空にあっても実質因果関係にない遠方のマルチバース

テグマークのマルチバース.

- 観測的宇宙 (因果関係を持つことのできる領域:420 億光年) を一つの宇宙と考える.
- 宇宙が $2^{10^{118}}$ 個以上, 観測的宇宙の外に広がっているとすると, 全く私たちの宇宙とうり二つの別の宇宙が存在.

多世界解釈でのマルチバース

世界は量子論にしたがって, 無限に分岐を続ける.

- タイムマシンのパラドックスを解く方便:”あなた”が過去に戻って, 自分を産む前の母親を殺してしまったとしても, その人は無限に存在する別の宇宙の母親?

無限に宇宙が存在するならば, 他の宇宙はどんな宇宙なのだろうか?

7 人間原理, 宇宙の未来

人間原理

- 現在の宇宙の法則, 物理定数は, 我々人類が生まれるようにデザインされている. 少しでも, 電磁気力, 強い力, ・・・の強さが異なると, 人間 (生命) は生まれない
- 認識主体 (知的生命体間) が生まれる宇宙のみ存在が認識される. 他の宇宙は認識されない.
- したがって, 認識された宇宙は認識主体が生まれるようにあたかもデザインされたように見える.

神が我々の住んでいる宇宙と同じような宇宙を作り出すためには, 途方もなく小さな位相空間の小さな体積 ($1/10^{10^{123}}$) をねらう必要がある. (R. ペンローズ, 1998) 物理定数は人間が宇宙に生まれるようにデザインされているのか?

時間空間の次元の数

- 空間次元が 3 より多いと, 電子が核に, 惑星は太陽に落下.
- 空間次元が 3 より小さいと, 多様な構造ができない.

大統一理論 SU (5) からの相転移

- $SU(5) \rightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ の谷底に落ちれば我々の世界が形成. 相転移の起こり方で, この世界の力は違ったものになったかもしれない.
- $SU(5) \rightarrow SU(4)$ or $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. “粘性” の違いでどちらの力になるか分からない. 宇宙が生まれた後に, どちらに転ぶかが決まる.

人間原理歴史

- Robert Dicke (1961):
人間の存在は宇宙の年齢が現在の $1/10$ でもまた 10 倍でもあり得ず, 極めて選ばれた存在と主張, また宇宙は極めて平坦に調節されていなければビッグクラッシュで潰れ観測者は存在しないと主張 (宇宙を平坦なまま膨張させるのは, 初

期において極めて厳しい微調整が必要だから).

- Brandon Carter (1973):
 - 弱い人間原理: この宇宙に人類が生存しているという事実から, 宇宙の初期条件, 進化の条件が決まる.
 - 強い人間原理: 物理学の基本法則や定数も人類が生存しているという条件から決まる.

万物理論と基本定数

- 究極の法則があったとすれば, その中に基本定数は含まれているのか?
- あるとすれば, 何が基本定数か? 唯一残された統合された力の強さ? 時空の次元数? 4つの力に分岐するエネルギースケール, クォーク, レプトン, ニュートリノの質量などは自動的に導出されるはず.
- なぜその様な値なのか? すべて時空・空間の対称性, 幾何学量に帰し, 基本物理定数はないのか?

新たな発想による宇宙・物理法則の進化

生物の進化のアナロジー: マルチバースが自然選択で進化し, 現在の物理法則を持っている宇宙が生存競争に勝って存在しているのか?

“multiverse” の自然選択による進化

(The life of the cosmos, L. Smolin, 1997)

- 仮定
 1. ブラックホールが作られると別の新しい宇宙が生まれる
 2. その新しい宇宙の物理法則は, “少しだけ” 元の宇宙の物理法則から異なる.
- 結果
 - ブラックホールが多く作る宇宙が自然選択で栄える (自然淘汰).
 - 素粒子物理学の標準モデルのパラメータは, 多くのブラックホールを作るがゆえにその値となっている.

物理学的根拠は弱い.

人間原理の評価

認識主体となる知的生命体は「人間」だけではないだろう.

- 「コペルニクスの原理」的に考えれば, 宇宙には多くの知的生命体がいるはず

で,それぞれ人間原理を唱えているかもしれない.

- 物理法則が異なる別の宇宙でも知的生命体が生まれられない根拠はない. そのような宇宙でも同じように人間原理を唱えているだろう.

また一方で...

- 究極の理論を記述する方程式に,何らかの定数が含まれていたとき,それを説明する原理は「人間原理」しかない.
- また究極の理論が唯一の物理法則,空間次元などを決める原理を持たず複数のものを示唆するだけならば,結局「人間原理」によるしかない.

しかし,人間原理は最終的な究極の理論では避けられないが,乱用すると科学的研究の放棄.

今後の観測・実験的検証

- 国際・線形加速器計画: 加速器で火の玉を作ることにより,宇宙の始まりが解明できるかもしれない.
- LISA:宇宙レーザー干渉計型重力波検出器: 重力波で,宇宙初期の姿が描き出されるかもしれない. インフレーション期から重力波は透明. 晴れ上がり以前を見ることができる.

まとめ

- ケルビンの指摘: エーテルの未検出, 黒体輻射の発散という暗雲が相対論, 量子論への鍵だった.
- 暗黒エネルギー, 暗黒物質問題は新たな物理学の鍵か?

8 相対性理論とタイムマシン

タイムマシン問題

SFの永遠のテーマ。「親殺しのパラドックス」など論理的矛盾をきたす。

「過去に行って、自分を産む前の母親を殺したらどうなるのか？ 母親を殺せる自分は生まれず、従って母親を殺せないはずだ」。

しかし、一般相対論はタイムマシンを禁止していない!!

タイムマシン

時間的閉曲線 (CTC: Closed Timelike Curve) はアインシュタイン方程式の解として存在. K. Thorne (Phys. Rev. Lett 1988):ワームホールを用いたタイムマシンの作り方を示した. (余談) 同僚の数学者・ゲーテルがアインシュタイン方程式の解として時間的閉曲線を含む解を発見した時、アインシュタインは動揺した。

K. Thorne のタイムマシン

作り方: 1つの時空内に、2つの場所をつなぐワームホールを用意. ワームホール的一方を高速で (相対論的速度で) 運動させ時間を遅らせる. 動かした方の口から入り、もう一方の口から出る.

ポイント: タイムマシンを作った時刻より昔には帰れない. ワームホールを通行可能に保つためには、負のエネルギーを満たさねばならない. ワームホールは量子的揺らぎによるミクロな物を拡大. 将来の知的生命体が実現するだろう.

タイムマシン・CTC問題

すべては定められているのか?

- 時間が環になっていても、無矛盾につながっていればよいのではないか? (Principle of self consistency)
- 自由意志を持っていると想定しているのは幻想? (I. Novikov 1998)
- 時間順序保護仮説 (S. Hawking, 1990)
 - 相対論が許しても量子論が許さないのではないか? ワームホールの量子重力的不安定性.
- 多世界解釈により、因果律に反することなくタイムマシンは可能 (D. Deutsch, M. Lockwood, 1994)
 - 過去に行って歴史を変えても、その宇宙は別宇宙