



暗黒エネルギー問題と修正された重力理論

山内 大介*

Dark energy problem and modified theory of gravity

Daisuke YAMAUCHI*

1. 標準宇宙論と未解決問題

□本稿の最初に、現代宇宙論の一つの到達点である標準的な宇宙モデル、「標準宇宙論」について概観し、残された未解決問題について議論する。

1. 1. 宇宙論の現状*

□宇宙論とは、宇宙全体やその内部に存在する構造物が、どのように形成され、そして発展してきたのかについて、科学的手法を用いて理論的・観測的に解明していく学問である。特に、近年の観測技術の発展により、標準的な宇宙モデルはほぼ確立しており、それは次のようなものである。

□まず、大局的なスケール（超銀河団を超えるスケール、約 100 [Mpc] 以上）で宇宙を平均して見た場合、特別な場所は存在せず（一様性）、また特別な方向も存在しない（等方性）という一様等方宇宙モデルを採用している。

この一様性・等方性については、ビッグバン後約 38 万年頃に原子が形成され、光が直進できるようになった時期の残光である宇宙マイクロ波背景放射（Cosmic Microwave Background : CMB）の精密観測が行われたことにより、妥当性が確認されている。CMB とは、天球上の全方向からほぼ等方的に観測されるマイクロ波であり、そのスペクトルは 2.725 [K] の黒体放射に極めてよく一致することが知られている。重要な点としては、CMB には約 10^5 程度の非等方性が含まれている点である（図 1 参照）。この揺らぎは宇宙論パラメータや宇宙の幾何学を定めることで理論的に予言することが出来、実際の観測と比較することで宇宙モデルを決定することが可能となる。

□最新の CMB 観測衛星 Planck の観測結果¹⁾によると、通常物質を構成するバリオンの量は、宇宙全体の約 5% 程度に過ぎず、約 27% がほぼ重力相互作用しか行わない冷たい暗黒物質で構成され、残りの約 68% が宇宙を加速させる原因となる正体不明のエネルギー（暗黒エネルギー）であることが分かっている（図 2 参照）。またこのモデルでは一定の空間曲率が許容されているが、CMB の観測からこの曲率は非常に小さく制限されており、この宇宙は極めて平坦に近い宇宙であることが判明している。

□このような一様等方宇宙モデルは、観測を非常に良く説明するモデルであるが、そもそもなぜこのような条件の宇宙が生じたのかという疑問が生じてくる。その疑問に対し説明を与える最も有力なモデルが宇宙初期における指数関数的急膨張（インフレーション）を仮定するモデルである。このインフレーションモデルは、ビッグバン宇宙論におけるいくつかの問題（地平線問題、平坦性問題、モノポール問題）を一挙に解決する解法として導入された。宇宙初期の光速を超える急膨張によって、当初因果関係を持っていた小さな領域を現在観測可能な範囲を超えて拡大することにより、非常に一様等方な宇宙を実現することが出来る。さらに、インフレーションモデルでは、インフレーションを生じさせる場としてインフラトンという場を仮定するが、その場の量子的な揺らぎから、超銀河団、銀河団、銀河のような大規模構造の種となるわずかな密度揺らぎを生成することも可能にしている。

1. 2. 宇宙論の未解決問題

□標準的な宇宙モデルは観測を非常によく再現するが、依然として多くの本質的な疑問も多く残されている。未解決問題の中でも重要な課題としては次のようなものが考えられる：実際に宇宙最初期で起こったインフレーション

*特別助教 物理学教室
Assistant professor, Institute of Physics



図 1. 宇宙マイクロ波背景輻射の温度揺らぎマップ⁽¹⁾. 全天に亘って 10^{-5} 程度の揺らぎを持つ.

ヨンの具体的なモデルは何か？原始密度揺らぎの生成機構は何か？暗黒物質の正体とは？宇宙の加速膨張の物理的な原因は何か？これらの謎に物理的に自然な説明を与えることが現代宇宙論の目標と言えるだろう。

□インフレーションモデルの検証に関して、最も基本的な検証法は宇宙の密度揺らぎの測定が挙げられる。この揺らぎはモデルの違いによって特徴のある空間スケール依存性を示す。よって、その特徴を観測的に捉えることが、各インフレーションモデルを制限していく上で非常に有効な手段となる。将来観測においては、インフレーション起源の原始重力波の観測が計画されている。その振幅はインフレーションのエネルギースケールと直接関係づけることが知られており、もし観測出来ればインフレーションモデルにとって決定的な証拠となりえる。

□暗黒物質については、素粒子理論の分野において活発な研究がなされており、既に多様な候補が提案されている。その正体を探る方法としては、暗黒物質がわずかに行う可能性のある通常物質との相互作用を検出する直接検出実験や、暗黒物質が対消滅や崩壊をする際に生成するガンマ線や高エネルギーの粒子を観測する間接検出実験、さらには加速器による実験が多数行われている状況である。それらは加速器実験等を通じて検証を待っている段階であり、近い将来重要な示唆が得られるものと期待している。

□その一方で、宇宙の加速膨張の原因、つまり暗黒エネルギーについては未だその解決の糸口すら全く見つかっていない。本稿では、この暗黒エネルギーの正体について議論したい。

1. 3. 宇宙観測

□CMB 観測以外にも様々な宇宙論観測が行われている。その中でも銀河サーベイについて言及しておくことにする。銀河の空間的な分布は背後にある密度揺らぎの分布

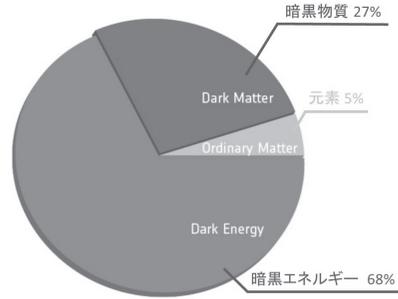


図 2. 宇宙の構成要素⁽¹⁾. 通常の物質である元素は 5%に過ぎず、残りの 95%は未知の物質。

を反映していると考えられる。そこで、銀河の空間分布地図を作り、その性質を調べることで密度揺らぎ、ひいては宇宙論の情報を引き出すことが出来る。銀河サーベイとは、多数の銀河の位置を一つ一つ定め、観測している手法のことである。

□銀河サーベイを用いた代表的な観測手法として、バリオン音響振動 (Baryon Acoustic Oscillation : BAO) が知られている。これは宇宙の再結合以前的光子とバリオンがトムソン散乱とクーロン相互作用を通じて混合流体として存在していた時期の音波振動と、再結合後に音波振動が光子から脱結合したバリオンと暗黒物質の重力相互作用を通じて宇宙大規模構造に反映された振動パターンを指す。後者の BAO 振動パターンのスケール (音響ホライズン) は、再結合から現在に至るまで不変であることがわかっており、宇宙の大規模構造を測定する際の距離指標として使うことが可能である。そのため、宇宙の大規模構造観測で BAO を検出することで宇宙の空間的な幾何学や膨張の履歴を小さな系統誤差で導くことが出来、暗黒エネルギーの物理的性質および重力理論の検証などの宇宙に関する基礎的問題を調べる手段となっている。

□加えて、銀河の相関関数の非等方性として観測される赤方偏移変形 (Redshift Space Distortion : RSD) も非常に有用な手法として盛んに利用されている。RSD とは個々の銀河の固有速度によって生じた赤方偏移による効果で、たとえ実空間における銀河の分布が等方であっても、実際に観測される赤方偏移空間上では非等方な揺らぎになってしまうことから発生する。この固有速度の影響は、密度揺らぎの成長率と関係づいており、その成長に対する暗黒エネルギーの影響を調べることに利用することが出来る。

□最後に、重力レンズ効果を利用した方法を説明する。重力レンズ効果とは、サーベイ対象の銀河からの光が経路上の物質場による重力によって経路が直線からずれる

ことを指す。特に、弱重力レンズ効果は宇宙の物質分布、つまり密度揺らぎの情報を保持しており、暗黒物質や暗黒エネルギーの密度揺らぎに与える影響などについて詳細に調べるために利用することが出来る。

□これらの多様な宇宙観測を組み合わせて観測的な制限を得る。暗黒エネルギーの性質を観測的に明らかにするために、次のような状態方程式パラメータがよく使われる：

$$w = \frac{p}{\rho}, \quad (1)$$

ここで、 ρ および p は空間平均した暗黒エネルギーのエネルギー密度と圧力である。後で述べるように暗黒エネルギーが宇宙項であった場合には厳密に $w = -1$ となることから、標準宇宙論においてはこれが仮定されている。宇宙項でない場合には一般に時間に依存することから、 w を赤方偏移等で展開したパラメータが使われる。現在までに、CMB、超新星、BAO、重力レンズ効果等の既存の観測を組み合わせるこれらを検討しているが、現在において $w = -1$ からの有意なずれの証拠は見つかっていない⁽²⁾。

2. 暗黒エネルギー

□現代宇宙論における最も大きな謎の一つとして、宇宙の加速膨張の物理的な起源の解明が挙げられる。本章では、暗黒エネルギーに関して、よく知られた宇宙項問題について言及した後に、その代替要素として注目を集めている修正重力理論について議論する。

2. 1. 宇宙項問題

□宇宙の加速膨張の原因となるエネルギーを一般に「暗黒エネルギー」と呼ぶが、その存在が決定的になったのは、1990年代末の Ia 型超新星を用いた宇宙膨張の観測⁽³⁾⁽⁴⁾以降である。それらの観測により、観測された超新星の見かけの光度が減速膨張宇宙の場合と比べて暗いという事実が発見された。これは同じ後退速度で運動する、もしくは同じ赤方偏移を示す超新星までの距離が減速膨張しているときに比べて相対的に大きいことを意味する。このことから、宇宙が加速膨張しているということが判明した。

□暗黒エネルギーの物理的な原因について議論する前に、標準宇宙論の根幹をなしている一般相対性理論（以下、一般相対論と呼ぶ。）について言及しておく。一般相対論はアインシュタインにより 1915 年に発表された古典的な重力場を記述する理論体系である。基礎方程式であるアインシュタイン方程式は次のような形をしている：

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}. \quad (2)$$

ここで、左辺はアインシュタインテンソルと呼ばれる量で時空の曲率を表す幾何学量を表している。一方、右辺は物質場のエネルギー運動量テンソルであり、物質場の分布を表している。このことから、物質場の分布を与えることでその物質の周りの時空がどのように曲がっているかを表現していると言える。一般相対論は mm スケールのような日常的なスケールから Gpc スケールのような宇宙論的なスケールに亘る広範な検証が現在においてもなおなされているが、その差異は見つかっていない⁽⁵⁾。

□これを踏まえ、暗黒エネルギーの最も単純な候補として、アインシュタインが 100 年前に導入した「宇宙項」を考えることが出来る。これは先ほどのアインシュタイン方程式に

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}. \quad (3)$$

となる項を加えることに対応している。アインシュタインの宇宙項にはもともと物理的意味はなく、余分な項として導入されたものであった。現代的には、宇宙項を右辺に移項することで物質場として理解される。時間変化せず、その圧力はエネルギー密度と振幅が同じで負の値を持つ、つまり $w = -1$ の物質場と振る舞う。そのような性質を持ち、既存の物理学に含まれるエネルギー源として、量子場の真空のエネルギーが考えられている。しかし、この模型には「宇宙項問題」と呼ばれる理論的な困難があることが知られている⁽⁶⁾。真空のエネルギーによる宇宙項の大きさは、典型的にはプランクスケールの紫外発散以下のエネルギースケールでの各量子場の寄与を足し合わせたものとして理論的に評価することが出来る。一方で、宇宙論的に観測された宇宙項の大きさは理論的に評価された値に比べて実に 10^{120} 桁以上も小さい値になる。そのため、宇宙項を厳密にゼロにする様々な機構が提案されている⁽⁷⁾。しかし、宇宙項の大きさがゼロではなく、極めて小さいがゼロではない値が残るとすると、一層深刻な問題となる。もし真空のエネルギーが暗黒エネルギーであるならば、 10^{120} 桁にも及ぶ値のキャンセルが起こりつつ、そのような小さな宇宙項の値が実現しているのかについて自然に説明しなくては行けない。しかし、これまでにおいてうまい方法論は提案されていない。

2. 2. 代替模型

□宇宙項問題により、既存の素粒子模型の枠内においては真空エネルギーによる宇宙の加速膨張の説明は難しいと考えられている。そのため、暗黒エネルギーが宇宙項

ではない別の代替要素によって実現している可能性が盛んに議論されている。最も単純な方法の一つとして、宇宙の加速膨張を引き起こす新しい場を導入するモデルが提案されている。その中でも最も有名なものとしてクインテッセンス⁽⁷⁾と呼ばれるポテンシャルを転がるスカラー場のモデルが知られている。これらのモデルは典型的にはアインシュタイン方程式の右辺側に新たな場のエネルギー運動量テンソルを導入する形で実現する。つまり、

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} + X_{\mu\nu}, \quad (4)$$

加えたエネルギー運動量テンソルが漸近的に宇宙項と同じような振る舞いをすることで暗黒エネルギーを代替することが可能となる。しかし、一般に新たな場は宇宙膨張に従って進化するため、状態方程式パラメータ w は時間に依存する。よって、この時間依存性を観測データから探査することでモデルを峻別することが出来る。

2. 3. 宇宙論スケールでの重力理論の修正

□別のシナリオとして、宇宙論的スケールにおいて一般相対論自体を修正することにより加速膨張を説明するというアプローチも存在し、それらは一般に修正（もしくは拡張）重力理論と呼ばれている。なぜならば、暗黒エネルギーの存在を示す観測的な証拠は宇宙論的距離・時間離れた遠方の重力の物理によって決まっているからである。また、そのような距離・時間スケールにおいては一般相対論の検証がなされていないため、このような可能性の検証が重要になってくる。

□これまで、既存の観測的制限を満たす多様な修正重力理論が多数提案されている。その中でも有名な模型として、 $f(R)$ 重力理論⁽⁸⁾、DGP重力理論⁽⁹⁾、ガリレオン理論⁽¹⁰⁾、質量を持つ重力理論⁽¹¹⁾⁽¹²⁾がある。修正重力理論においては、一般相対論においても現れるテンソル自由度に加えて、宇宙の加速膨張を引き起こす新しい自由度を含むことが多い。この中で最もシンプルな修正として、一般相対論に単一のスカラー自由度を加えたスカラー・テンソル理論がある。興味深い点として、多様に存在する修正重力理論の理論空間の中で、小さくない理論のクラスが、ある極限においてホルンデスキー理論と呼ばれるスカラー・テンソル理論⁽¹³⁾（及び、その拡張理論^{(14),(15)}）によって記述することが出来る点である（3. 1. 章参照）。その一方で、修正重力理論は太陽系における一般相対論の精密なテストによって厳しく制限されている。そのため、小スケールにおいて一般相対論の予言を大きく変更する力（「第5の力」と呼ばれる。）を媒介しうる余剰の自由度が励起することは許されない。実際、これら

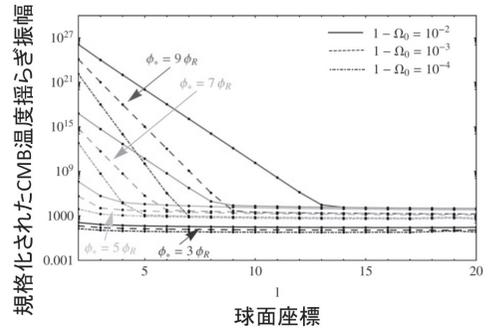


図3. 量子的遷移を含むインフレーションにおけるCMB温度揺らぎスペクトル。色の違いはモデルパラメータの違い。量子遷移により低い球面座標モードで大きな増幅が起こる。量子論的な宇宙創成シナリオ、および、ストリングランドスケープシナリオは観測から探査しうるものであることを指摘⁽¹⁸⁾。

の理論には、小スケールにおいて第5の力を遮蔽する機構が存在することが期待されており（3. 2. 章，3. 3. 章を参照），観測と矛盾することなく理論構築を行うことが出来る。

2. 4. 人間原理的解釈

□基礎理論を修正することで暗黒エネルギーの正体に迫る研究がある一方で、人間原理を用いた提案もなされている。人間原理的解釈とは、量子的な宇宙創成シナリオによると、基本物理定数や宇宙パラメータの異なる宇宙が無数に存在する。そんな中で適切な条件を満たす限られた宇宙だけに知的生命体が生まれる。従って、我々の宇宙の基本物理定数は、知的生命体が生まれる条件からある程度決まるはずだ、という主張である。実際に、宇宙項が我々の観測する値より遥かに大きな値であった場合、観測者たる我々人類が存在出来ないため、そのような宇宙は選ばれない⁽¹⁶⁾。近年では、素粒子統一理論の候補である超弦理論の文脈において、 $\sim 10^{500}$ 個もの莫大な数の異なる基本物理定数を持つポケット宇宙を生成することが示唆されており、これらが結びつくことで、宇宙項を宇宙全体に亘るランドスケープ上において人間原理的に解釈する可能性が議論されている⁽¹⁷⁾。この描像をストリングランドスケープと呼ぶ。

□これまでにおいて、この提案は推論の域をはずし、観測的に検証のしようがないと考えられてきた。しかし、本研究において、量子論的な宇宙の創成モデルの特殊性を通じてこの可能性を探ることが出来ることを見出した⁽¹⁷⁾。

(18). 量子論的な宇宙生成の結果、我々の宇宙は微小ながらゼロではない負の空間曲率を持つことが予言されることから、空間曲率の精密観測を通じて探査しよう。さらには、CMB や他の宇宙論的な観測量にも特異な振る舞いが表れることを指摘した。これは、このシナリオおよび解釈を観測的に検証することが可能になることを示している (図3参照)。

3. 修正重力理論

□前章までに述べたように暗黒エネルギーの代替要素として、重力理論が一般相対論と異なっている可能性が盛んに議論されている。本章では修正重力理論に関する近年の進展およびその中で筆者の寄与について簡単に概観する。

3. 1. ホルンデスキー理論

□修正重力理論の大きなクラスは、ある種の極限においてスカラー・テンソル理論に帰着することが知られている。この事実から、修正重力理論を俯瞰的な立場から検証するために、(不安定性を持たない) 一般的なスカラー・テンソル理論を記述出来る理論の構築が盛んに研究されている。その中でもホルンデスキー理論はこれまでの理論研究において中心的な役割を果たしてきた。スカラー場と計量をダイナミカルな自由度とするホルンデスキー理論のラグランジアン密度は次のように与えられる⁽¹³⁾：

$$L_H = K(\phi, X) - G_3(\phi, X) \nabla^2 \phi + L_4 + L_5, \quad (5)$$

ここで、 X はスカラー場の運動項を表す。 L_4, L_5 はスカラー場の高次微分項を含む項であるが、煩雑になるので詳細は省く。この理論の特色として、「スカラー場と計量の両者の運動方程式が高々2階微分となる最も一般的なスカラー・テンソル理論」である点が挙げられる。一般に、運動方程式に時間について高次微分を含む理論は不安定になることが知られており、現実的な理論モデルとしては不適格である。従って、ホルンデスキー理論は(少なくとも高次微分を含まないという意味で)不安定性を明らかに含まない最も一般的なスカラー・テンソル理論と言える。そのため、安定なあらゆるスカラー・テンソル理論、ひいては極限的にスカラー・テンソル理論に帰着する修正重力理論のクラスを網羅的に探求することが出来ると考えられている。

3. 2. 遮蔽機構

□既に述べたように、これまで提案されてきたほとんど

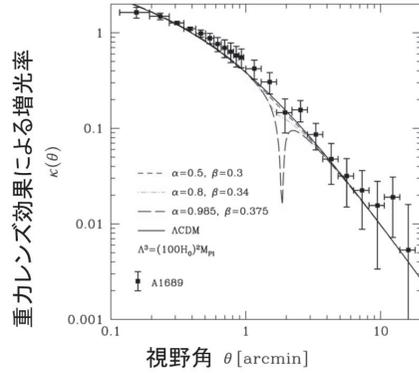


図4. 修正重力理論の遮蔽機構を銀河の重力レンズ効果をもちいて観測的に制限する。色は理論モデルの違い。エラーバー付きのドットは実際の観測データを表す。この手法により、いくつかのパラメータは観測から既に排除されていることがわかる⁽²⁰⁾。

全ての修正重力理論においては、太陽系スケールでの観測的制限を自然に回避する遮蔽機構を持つと期待しているが、露わには示されていない。本研究においてはホルンデスキー理論における遮蔽機構を探ることで、露わにこれを示すことに成功した⁽²⁰⁾。ここでは、紙面の関係上、簡便な場合でその概略を議論する。簡単のため、球対称な密度分布を考える。対応する計量として次のようなものを考えれば十分である：

$$ds^2 = -(1+2\Phi(r))dt^2 + (1-2\Psi(r))\delta_{ij}dx^i dx^j. \quad (6)$$

ここで、 Φ, Ψ は重力ポテンシャルに対応する量であり、太陽系における重力のテストから $|\Phi - \Psi|/\Phi < 10^{-4}$ となることが知られている⁽⁶⁾。簡便な状況として、静止した物質場に結合した次のようなスカラー場のラグランジアン密度を考える：

$$L = -\frac{1}{2}(\partial\phi)^2 + \frac{1}{4\Lambda^3}(\partial\phi)^2 \nabla^2 \phi - \frac{1}{M_{Pl}}\phi\rho_{mat}. \quad (7)$$

このときスカラー場の運動方程式を積分することで、以下の代数方程式に従うことを示すことが出来る。

$$\frac{1}{\Lambda^3} \frac{\phi'}{r} + \left(\frac{1}{\Lambda^3} \frac{\phi'}{r} \right)^2 = \frac{1}{M_{Pl} \Lambda^3} \frac{M}{4\pi r^3}, \quad (8)$$

また、重力ポテンシャルはスカラー場と次の関係式を満たす：

$$\Phi' = \frac{GM}{r^2} - \frac{\phi'}{M_{Pl}}, \quad \Psi' = \frac{GM}{r^2} + \frac{\phi'}{M_{Pl}}, \quad (9)$$

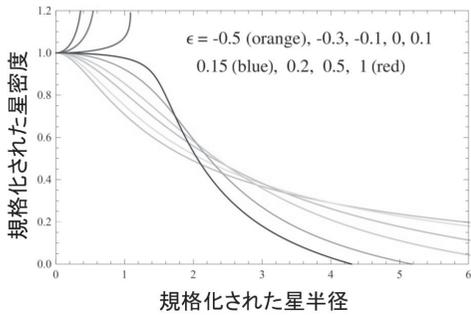


図5. 拡張ホルンデスキー理論における星構造への影響. 遮蔽機構の破れによって, 密度勾配を通じて補正が表れる⁽²¹⁾. 星のような構造を生成できないパラメータが存在することを指摘⁽²²⁾.

ここで, (9)式の右辺第2項がニュートン重力に対応しており, 残りのスカラー場からの寄与がニュートン重力には表れない第5の力を媒介していることを表している. これらの式から遮蔽機構の有無を探索することが出来る. まず十分遠方を考えると, (8)式から

$$\phi' \approx \frac{M}{4\pi M_{Pl} r^2}, \quad (11)$$

となることがわかり, これを(9)式に代入すると Φ と Ψ が一致しないことがわかる. この事実は, 遠方では第5の力がニュートン重力と同程度の寄与をするため, 一般相対論からのズレが顕著になることを表している. 一方で, 十分短距離では(7)式左辺の高次項が支配的になる. これにより, スカラー場の寄与(第5の力)は重力ポテンシャルに比べて小さくなる(遮蔽される)ことで $\Phi=\Psi$ が実現し, 一般相対論の結果を再現する. このようにスカラー自由度の非線形作用によって, スカラー自由度自身が実効的に誘起されなくなる機構を特にバインシュタイン機構と呼ぶ. 実際にこれをホルンデスキー理論に拡張した場合であっても同様の機構が働くことを確認することが出来る.

□興味深い点として, 遮蔽機構が働いている場合であっても, 振る舞いが変わる境界では第5の力の振る舞いが大きく変化することで観測量に影響する. 本研究において, 一般的な遮蔽機構の存在を示す一方で, 図4に示すように, 実際の観測データ, 特に銀河団の重力レンズ効果を通して, 遮蔽機構の存在を観測からテストすることが出来ることを見出した⁽²⁰⁾(図4参照).

3. 3. ホルンデスキー理論を超えて.

□最も一般的なスカラー・テンソル理論を構築することは, 暗黒エネルギー問題に対して網羅的な探査が可能になる, という点において非常に重要である. 近年までホルンデスキー理論が最も一般的なスカラー・テンソル理論であると考えられてきた. これは不安定性を回避しつつ「運動方程式が高々2階微分」という条件を緩和することは不可能だと信じられていたからである. しかし, この条件を緩和しつつ安定な理論の存在が示唆された⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾. 理論空間は非常に広範であるが, 典型的には以下のような項が新たに許容される:

$$F(\phi, X)\varepsilon^{\mu\nu\sigma\alpha}\varepsilon_{\alpha\beta\gamma\delta}\nabla^\alpha\phi\nabla_\mu\phi\nabla^\beta\phi\nabla^\gamma\nabla_\rho\phi\nabla^\delta\nabla_\sigma\phi. \quad (12)$$

明らかにこの項の存在により, 運動方程式に高次微分を一般に含む. それでもなお適切にゲージ自由度を選ぶことで不安定性がないことを示すことが出来る.

□本研究では, この一般化された理論においてバインシュタイン遮蔽機構が適切に働けるかについて探った⁽²¹⁾. 物質場の近傍を考える限りにおいて, ホルンデスキー理論においては常にバインシュタイン遮蔽機構が働くのに対し, 拡張理論を考えると一般には $\Phi=\Psi$ は成立せず, 遮蔽機構が部分的に破れるという特異な性質があることを見出した. 特に, 近距離における重力ポテンシャルは次の式に従う:

$$\Phi' = G\left(\frac{M}{r^2} + \varepsilon M''\right), \quad (13)$$

$$\Psi' = G\left(\frac{M}{r^2} - \tilde{\varepsilon}\frac{M'}{r}\right), \quad (14)$$

ここで, ε は拡張理論の典型的なパラメータである. これらの式から, 密度勾配が存在する領域において一般相対論からのずれが大きくなることがわかる. 密度に依存して遮蔽が破れるという例はこれまで存在せず, この特異性を通じて拡張されたホルンデスキー理論を制限することが可能になる.

□遮蔽機構の破れは密度勾配が大きいところで重要な役割を果たす. 実際に, 星構造の進化に鋭敏であることを示すことが出来る⁽²²⁾. 図5に示すように, 特定のパラメータにおいては星のような構造を作ることを出来ない. 本研究により, 拡張ホルンデスキー理論自体は安定で整合的であっても, 実際的には現実を再現しない可能性を初めて指摘した. さらに, 星構造のような宇宙論的なスケールに比べて小さなスケールの重力の物理の精密測定を通じて, 宇宙論スケールの重力の物理を探求出来る

いう例を与えたという点でも興味深い。これまで必ず実現すると思われていた遮蔽機構に破れが存在する可能性が指摘されたことで、既存の理論についても再考を迫ることになった。

3. 4. 質量を持つ重力理論とその拡張

□最後に、スカラー・テンソル理論以外の理論研究の進展について言及しておく。修正重力理論において、近年の最も大きな進展は質量を持つ重力理論の発見が挙げられる。重力子が整合的に質量を持つ可能性については1930年代から盛んに調べられてきた⁽¹¹⁾。しかし、不安定性の存在が指摘されてからこれまで重力子は質量を持つことが出来ないと考えられてきた。近年の研究の進展により、この問題を解決する手法が確立され、実際に重力子が整合的に質量を持つ理論が提唱されるに至った⁽¹²⁾。ラグランジアン密度は次のように与えられる：

$$L = \frac{M_{Pl}^2}{2} \left[R + m^2 \left((K^\mu{}_\mu)^2 - K^\mu{}_\nu K^\nu{}_\mu \right) + \dots \right] \quad (15)$$

ここで、第一項はアインシュタイン方程式を導く項であるのに対し、第二項は新たに見出された質量項である。特に、質量項に現れる K テンソルは

$$K^\mu{}_\nu = \delta^\mu{}_\nu - \sqrt{g^{\mu\rho} \eta_{\rho\nu}}, \quad (16)$$

である。テンソル量のルートという特殊なテンソルが表れるなど、興味深い理論構造を持つ。

□提唱された理論を用いた宇宙論についても活発に議論がなされた。その中でも、実際に重力子の質量項が実効的に宇宙項を与える解が得られており、暗黒エネルギーの謎と密接に関連していると考えられている。

□この理論には自然な拡張が存在することが示唆されていたが、これまで見つかっていなかった。特に、微分結合型の相互作用は、アインシュタイン方程式を導く項以外は見つかっていなかった重力子の運動項を与える。本研究において、微分結合型の相互作用を持つ自然な拡張を系統的に探索する方法論を定式化し、実際に許される相互作用の一部を同定することに成功した⁽²³⁾。次に示すような構造が候補として許容される：

$$\varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma} \varepsilon^{\alpha\beta\gamma\delta} R_{\mu\nu\alpha\beta} K_{\rho\gamma} (\alpha g_{\sigma\delta} + \beta K_{\sigma\delta}). \quad (17)$$

ここで、 α 、 β は定数である。理論の構築法自身には、 K テンソル構造は陽には含まれていないにも関わらず、自然に K テンソルが表れることを見出した。この意味において、有質量重力理論と密接な関連があると推測される。本研究で提案した運動項はパラメータによっては不安定

性を持つことがわかっているが、このクラスの安定な運動項が存在した場合、質量を持つ重力理論における宇宙論での問題点を解決しようと期待されており、さらなる深い検討を行う必要がある。

4. 将来観測

□これまで、CMB や超新星の測定を通じて暗黒エネルギーという宇宙論における最大の謎の存在が明らかとなった。今後、観測はさらなる高精度化・大規模化が進むことで、暗黒エネルギーの性質をも探査出来るようになるかと期待している。次世代計画の中でも、国際超大型電波宇宙観測計画 Square Kilometre Array (SKA)⁽²⁴⁾ は、暗黒エネルギー問題を含む宇宙論の未解決問題に決定打を与える計画として注目を集めている。SKA は南アフリカとオーストラリアに設置される予定の超大型電波望遠鏡であり、その名が示すように有効集光面積が 1 km^2 にも達する。大陸規模で観測機器を設置することにより、電波域においては高感度・高視野・広帯域・高分解能というこれまでにない比類のない特徴を備えている。

□宇宙論観測モードとして、1. 2. 章で述べた銀河サーベイを行う予定である。10億個もの銀河を観測することが計画されており、これまでにない精度・規模の宇宙大規模構造の3次元地図を描くことが出来る。重要な点として、電波域を用いた宇宙論はこれまでになく、既存の可視光域における宇宙論の探査と相補的な情報を提供できる。一方で、SKA 計画の特色として、中性水素の超微細構造遷移によって放出される 21cm 線を用いて宇宙の構造の進化に迫っていくことが出来る。特に、中性水素は銀河団や銀河、星のような構造がなくても存在するため、物質場の密度揺らぎそのものをトレースする。これにより、これまで観測されたことのない、いわゆる暗黒時代を観測しうる唯一の観測装置となる。宇宙開闢からほとんど時間の経っていない原始的な宇宙を探求し、暗黒エネルギーの性質や一般相対論のテストを行うことが出来るようになる^{(25), (26), (27)}。

5. まとめ

□本稿では、CMB に代表される精密宇宙観測を通じて確立された宇宙論の到達点の1つ、標準宇宙論を概説した。このモデルは、少数のパラメータで既存の観測データの殆ど全てを非常によく説明してくれる。しかし、そこから導かれた宇宙像には、既存の物理法則では説明することが容易でない未知の物質やエネルギーで我々の宇宙が埋め尽くされていることを示唆している。その中でも最大の謎の一つである暗黒エネルギーに注目し、その

問題点と提案されているいくつかの解決法を解説した。

□後半では、暗黒エネルギー問題の解決のため、暗黒エネルギーの代替要素として大きな注目を集めている修正重力理論についての近年の進展を概観した。特に、修正重力理論が最低限持つべき、小スケールで余分な自由度を遮蔽する機構の存在について重点的に議論した。

□本稿が、宇宙論研究の一端を伝える一助となれば幸いです。

□本研究は、Andrei Linde 教授 (Stanford University), 佐々木節教授 (京都大学), 田中貴浩教授 (京都大学), 小林努准教授 (立教大学), 渡辺悠貴講師 (群馬高専), 水野俊太郎助教 (早稲田大学), 斎藤遼博士 (京都大学基礎物理学研究所), 成子篤博士 (東京工業大学), 成川達也博士 (大阪市立大学), 木村蘭平博士 (東京工業大学) をはじめとする多くの方との共同研究として行われたものである。共同研究者の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) P.A.R Ade et al. [Planck Collaboration], "Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters", *Astron. Astrophys.*, **571**, A16 (2014-10), p.66.
- (2) P.A.R. Ade et al. [Planck Collaboration], "Planck 2015 results. XIV. Dark energy and modified gravity", arXiv:1502.01590, (2015-2), p.33
- (3) A.G.Riess et al. [Supernova Search Team Collaboration], "Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant", *Astron. J.* **116**, 1009 (1998-9), p.27.
- (4) S. Perlmutter et al. [Supernova Cosmology Project Collaboration], *Astrophys. J.* **517**, 565 (1999-6), p.21
- (5) C. M. Will, "The Confrontation between General Relativity and Experiment", *Living Rev. Rel.* **17**, 4 (2014-4), p.113
- (6) S. Weinberg, "The cosmological constant problem", *Rev. of Mod. Phys.*, **61**, 1 (1989-1), p.23
- (7) S. Coleman, "Why There Is Nothing Rather Than Something: A Theory of the Cosmological Constant", *Nucl. Phys. B* **310**, 643 (1988-4), p.25
- (7) B. Ratra, P.J.E. Peebles, "Cosmological Consequences of a Rolling Homogeneous Scalar Field", *Phys. Rev. D*, **3406** (1988-6), p.
- (8) A. De Felice, S. Tsujikawa, "f(R) theories", *Living Rev. Rel.* **13**, 3 (2010-3), p.156
- (9) G.R. Dvali, G. Gabadadze, M. Porrati, "4-D gravity on a brane in 5-D Minkowski space", *Phys. Lett. B*, **485**, 208 (2000-7), p.6
- (10) A. Nicolis, R. Rattazzi, Trinchieri, "The Galileon as a local modification of gravity", *Phys. Rev. D* **79**, 064036 (2009-3), p.36
- (11) M. Fierz, W. Pauli, "On relativistic wave equations for particles of arbitrary spin in an electromagnetic field", *Proc. Roy. Soc. Lond.* **173**, 211 (1939), p.22
- (12) C. de Rham, G. Gabadadze, A. J. Tolley, "Resummation of Massive Gravity", *Phys. Rev. Lett.*, **106**, 231101 (2011-6), p.4
- (13) G. W. Horndeski, "Second-order scalar-tensor field equation in a four-dimensional space", *Int. J. Phys.*, **10**, 363 (1974-9), p.21
- (14) J. Gleyzes, D. Langlois, F. Piazza, F. Vernizzi, "Healthy theories beyond Horndeski", *Phys. Rev. Lett.*, **114**, 21, 211101 (2015-5), p.4
- (15) X. Gao, "Unifying framework for scalar-tensor theories of gravity", *Phys. Rev. D* **90**, 081501 (2014-10), p.5
- (16) S. Weinberg, "Anthropic Bound on the Cosmological Constant", *Phys. Rev. Lett.*, **59**, 2607 (1987-11), p.4
- (17) L. Susskind, "The Anthropic landscape of string theory", in B. Carr (ed.); "Universe or multiverse?", p.19
- (18) D. Yamauchi, A. Linde, A. Naruko, M. Sasaki, T. Tanaka, "Open inflation in the landscape", *Phys. Rev. D* **84**, 043513 (2011-8), p.14
- (19) K. Sugimura, D. Yamauchi, M. Sasaki, "Non-Gaussian bubble in the sky", *EPL* **100**, 29004 (2012-10), p.7
- (20) T. Narikawa, T. Kobayashi, D. Yamauchi, R. Saito, "Testing general scalar-tensor gravity and massive gravity with cluster lensing", *Phys. Rev. D* **87**, 124006 (2013-6), p.10
- (21) T. Kobayashi, Y. Watanabe, D. Yamauchi, "Breaking of Vainshtein screening in scalar-tensor theories beyond Horndeski", *Phys. Rev. D* **91**, 064013 (2015-3), p.12
- (22) R. Saito, D. Yamauchi, S. Mizuno, J. Gleyzes, D. Langlois, "Modified gravity inside astrophysical bodies", *JCAP* **06**, 008 (2015-6), p.14
- (23) R. Kimura, D. Yamauchi, "Derivative interactions in de Rham-Gabadadze-Tolley massive gravity", *Phys. Rev. D* **88**, 084025 (2013-10), p.7
- (24) <http://www.skatelescope.org>
- (25) 例えば G. Zhao, D. Bacon, R. Maartens, M. Santos, A. Raccanelli, "Model-independent constraints on dark energy and modified gravity with the SKA", *PoS AASKA* **14**, 165 (2015-4), p.13
- (26) T. Kitching et al., "Euclid & SKA Synergies", *PoS AASKA*, **14**, 146 (2015-4), p.17
- (27) D. Yamauchi et al., "Cosmology with the Square Array by SKA-Japan", arXiv:1603.01959, (2016-3), p.17