

Title	Double Soft Limits of Cosmological Correlation Functions and Observability of Graviton Exchange
Author(s)	美澄, 暢彦
Citation	大阪大学, 2016, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/56080
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

論文内容の要旨

氏名 (美澄暢彦)

論文題名

Double Soft Limits of Cosmological Correlation Functions and
Observability of Graviton Exchange

(宇宙論的相関関数の二重軟極限と重力子交換の観測可能性)

論文内容の要旨

現在の宇宙論において、インフレーションの存在はCOBE, WMAP, PLANCKなどの衛星および地上の観測からほぼ疑いようがなく、具体的なインフレーションモデルの探索の段階に突入している。

WMAP衛星が打ち上げられた頃まで、理論および観測の中心は揺らぎの2点相関関数が主であった。その後、インフレーションモデルの特定のためにはより高次の相関関数についての情報が必要とされ、特に3点相関関数について精力的な研究が続けられてきた。

3点相関関数の研究における重要な帰結の一つが軟極限関係式の導出である。この関係式は、曲率揺らぎの3点相関関数が1つのモードの運動量が0になる極限において、2点相関関数のスケール変換で決定されると言っている。さらに、この関係式は揺らぎのスケール不変性を表す量であるスペクトル指数で表され、現在の観測からほぼ0になる。つまり、もし観測でこの極限での3点相関関数が測られ、かつ0でない値を持つと、全ての単一場インフレーションモデルが棄却されることから、この関係式は極めて重要な意味を持つ。この軟極限関係式の起源は、スカラー摂動が持つインフレーション中の3次元超曲面上のSO(1, 4)対称性の自発的な破れについて南部-ゴールドストーン・ボソンの役割を果たしていることにある。スカラー摂動の非線型表現からいわゆるソフト・パイオン定理として軟極限関係式が得られる。N点相関関数についての軟極限関係式も様々な方法で求められている。

近年、軟極限関係式を拡張した二重軟極限関係式が求められた。これは外線の運動量のうち2つが他の運動量よりも十分に小さいという極限での関係式である。本論文では、この二重軟極限関係式をさらに拡張して内線に重力子が存在する場合の関係式の導出を背景波法およびワード・高橋恒等式を用いた方法の2通りで行った。二重軟極限関係式を拡張して重力子を含める意味は重力子の効果のみを取り出すことが可能な点にある。4点相関関数においてcounter collinear limitと呼ばれる極限では、重力子交換は3点相関関数の振幅と同程度つまりスローロール・パラメータ程度の寄与を与えることが知られている。しかしこの場合は4点相関関数の他の寄与、つまりスカラー摂動のみからなる寄与も存在する。一方、4点相関関数の二重軟極限関係式では、スカラー摂動のみからなる寄与はディラレーション演算子の存在によりほぼ0となり、重力子交換の寄与のみが残る。つまり4点相関関数の二重軟極限の観測から、重力の量子効果を検出することが可能となる。現在、初期重力波の観測が盛んに行われているが、これはテンサー摂動の2点相関関数、つまり自由エネルギーを見ているにすぎない。4点相関関数が観測できれば、重力の相互作用を見ることが可能となる。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (美 澄 暢 彦)		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	教授 大野木 哲也
	副 査	教授 窪田 高弘
	副 査	教授 長峯 健太郎
	副 査	准教授 尾田 欣也
	副 査	助教 深谷 英則

論文審査の結果の要旨

初期宇宙に起こったとされる宇宙の指数関数的膨張すなわちインフレーションは、もともとは理論的審美性のもとに提唱されたものであったが、観測宇宙論の立場からはその詳細は未解決であり、素粒子論と宇宙論にまたがる重要な研究テーマとなっている。COBE, WMAP, PLANCK といった観測衛星によるデータの蓄積により、今やインフレーション模型の詳細を検討できる段階に入りつつある。また B モードと呼ばれる偏極した電磁波の観測の期待も高まり、宇宙開闢 38 万年後の宇宙晴れ上がりの時期より以前の情報にも手が届きつつある。そのような観測精度の進歩により、重力理論を量子論の枠組みの中で扱うことは今や現実的な意味を持つようになったと言える。

学位論文提出者美澄暢彦君は、背景輻射の温度揺らぎの相関関数から、重力場の量子論的な効果を見つける可能性を追究してきた。曲率揺らぎの 4 点関数には一般には重力子 (テンソルモード) 交換の寄与が存在するが、その効果をうまく抉り出す方法を見つけないというのがそもそもの動機であった。しかしながら 4 点関数を具体的に求めることは複雑極まりなく、たとえ計算が出来たとしても扱い方に方法論的な指針がない。幸いにしてここ数年に及ぶ相関関数の場の理論的研究により、4 点関数の 1 つの波数ベクトルをゼロにとる極限、いわゆるソフト極限では、4 点関数を 3 点関数の計算に置き換えられることが分かってきた。また、2 つの波数ベクトルをゼロにとる極限、ダブルソフト極限では 4 点関数はパワー・スペクトルを用いて表し得ることも分かってきた。そのような極限をとりながら重力子交換の効果を見つけないというのが美澄君の基本的な戦略であった。

美澄君は、まず従来テンソルモードを無視して導出されたダブルソフト極限の公式を、テンソルモードを取り入れて書換えることを行った。その方法は、カイラル・ダイナミクスにおけるソフト・パイオン定理の導出に似ている。美澄君は (1) ワード・高橋恒等式を用いる方法、(2) 長波長の揺らぎのモードが背景にある場合に相関関数を計算する方法、の 2 つを用い、どちらを用いても同じ結果に到達できることを示した。これらの方法の背後にあるのは、 $S_0(4, 1)$ という大局的な対称性である。宇宙論の揺らぎを計算するラグランジアンはゲージ固定されているのだが、それでも $S_0(4, 1)$ という共形対称性が残っている。この対称性に基づくワード・高橋恒等式を書き下し、ソフト極限を取るのが (1) のやり方である。一方大局的な対称性の存在は、位置座標に依存しない、すなわち長波長モードが量子揺らぎの中に存在することを意味している。このモードは *adiabatic mode* と呼ばれる。ソフト極限をとることは、この長波長モードが背景にある場合の相関関数を求めることに同等である。それはその相関関数を大局的な座標変換をすることによって得られることが、ペイズの定理を用いて示せる。これが (2) の方法である。

美澄君が用いた仮定は、インフラトンが1種類であること、波動関数の初期条件は通常よく用いられている Bunch-Davies 真空であること、この2つのみであり、極めて適用範囲が広い関係式を導いたことになる。

以上のやり方でダブル・ソフト極限の公式を得た美澄君は、4点関数のダブルソフト極限をスカラー並びにテンソル摂動のパワースペクトルを用いて表した。ファインマン・グラフの言葉で得られた公式を解釈すると、それらは、スカラー場の交換、スカラー場の接触作用、テンソル場の交換、の3種類の寄与となっていることが分かる。最後のものが重力子の交換、量子重力的效果に相当している。それらの大体の大きさは、PLANCK で得られているデータから知ることができ、重力子交換のファインマン・グラフは、スカラー場の効果よりも1桁程度大きく、支配的になることが分かった。

美澄君の研究の意味するところは深く重要である。すなわち、将来温度揺らぎの観測の精度が改善され、4点関数のダブルソフト極限が観測されたならば、それは量子重力の効果が初めて観測されたことを意味する。加速器実験では到底観測を望むことの出来ない量子重力の効果を、宇宙論の分野で観測する道を、美澄君は世界で初めて切り開いたことになり、初期宇宙論と量子重力理論の境界領域に大変重要な貢献をしたことになる。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。