素粒子メダル奨励賞受賞論文:

”Emergent bubbling geometry in the plane wave matrix model”

Y. Asano, G. Ishiki, T. Okada and S. Shimasaki, JHEP 1405 (2014) 075.

受賞論文の概要（著者: 伊敷吾郎）

素粒子に働く 4 つの力（重力・電磁気力・弱い力・強い力）を統一的に記述することのできる「究極の理論」の候補として超弦理論が知られています。この理論は従来の理論（場の理論）で解決できなかった問題（重力の繰り込み不可能性）を見事に解決し、この世界の最も基本的な理論であると期待されています。しかし、超弦理論は数学的にも非常に難解な理論であり、その構造を理解するために世界中の素粒子理論研究者が、現在研究を進めているところです。超弦理論はこれまで知られている理論にはない全く新しい性質を持っており、このような性質を理解することが今求められています。

近年最も注目を集めている超弦理論の性質の一つに、ホログラフィック原理と呼ばれるものがあります。ホログラフィーとは、SF 映画などでよくある「立体映像」のようなものです。驚くべきことに超弦理論の定式化を眺めていると、このような性質が理論に存在することが示唆されるのです。

図 1 はこのホログラフィック原理を示したものです。超弦理論の基本的な物体は弦（ひも）ですが、これは簡単に言うと輪ゴムのようなものです。これが時空を伝播して運動しているのが図 1 に見て取れると思います。さらに図 1 では超弦理論の定義されている時空が「境界」を持った場合を考えています。図の中の円筒が時空を表し、円筒の側面が境界を表しています。ホログラフィック原理とは、時空内部における弦の運動が、実は境界から投影されるホログラフィーとして記述できるというものです。すこし専門的な言い方をすると「弦の運動が、実は境界の自由度だけを使って記述できる」というのがこの原理の主張していることです。

超弦理論は重力を含んだ理論なのですが、ホログラフィック原理はこの重力の性質についても非常に興味深いことを述べています。図 1 における時空の内部では、弦の運動によって重力が伝播しています。一方で、境界上には重力の自由度はありません。従って、ホログラフィック原理は、時空内部の重力の自由度が実は「余分なもの」であり、重力のない境界上の理論だけを使って全ての運動を説明できる、と述べているのです。「重力を記述するのに、重力の自由度は必要ない」というこの主張は、我々の重力に対する自然観

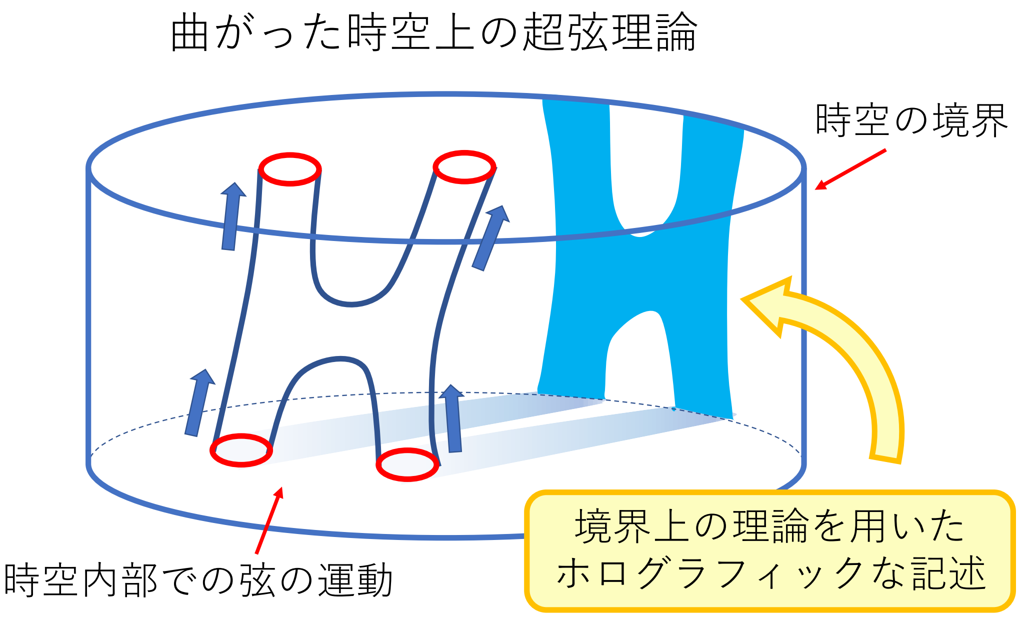

図 1　ホログラフィック原理

を覆す、とても興味深いものであると言えます。

ところで、上で述べたように超弦理論は非常に難解な理論であり、現在の定式化だけでは、超弦理論の数式を解いて全ての現象を説明することがまだできていません。しかし、もしこのホログラフィック原理が確立されれば、境界上のより簡単な理論を用いて超弦理論を記述することができ、超弦理論の理解が飛躍的に進むと期待されます。このような背景により、ホログラフィック原理の研究は現在、素粒子理論分野の中心的なテーマの一つとなっています。

ホログラフィック原理は、現段階ではまだ予想にすぎません。つまり、多くの具体例により、このような原理が存在しそうだ、ということは示唆されているのですが、その存在はまだ厳密に証明されていません。上でも述べましたが、ホログラフィック原理の主張は「時空の中で起こっている全ての現象が、ホログラフィーで説明できる」というもので、とても強く、非自明な主張です。このような主張が本当に成り立っているのかどうか、今後さらに検証を重ねていく必要があります。

さて、今回の素粒子メダル奨励賞を受賞した研究では、時空の「曲がり方」までホログラフィーとして実現しているのかどうかを検証しました。アインシュタインの一般相対性理論によって、我々の住んでいる時空は「曲率」を持っており、それが重力を生み出す源になっているということが示されました。超弦理論の定義されている図 1 の時空も、一般

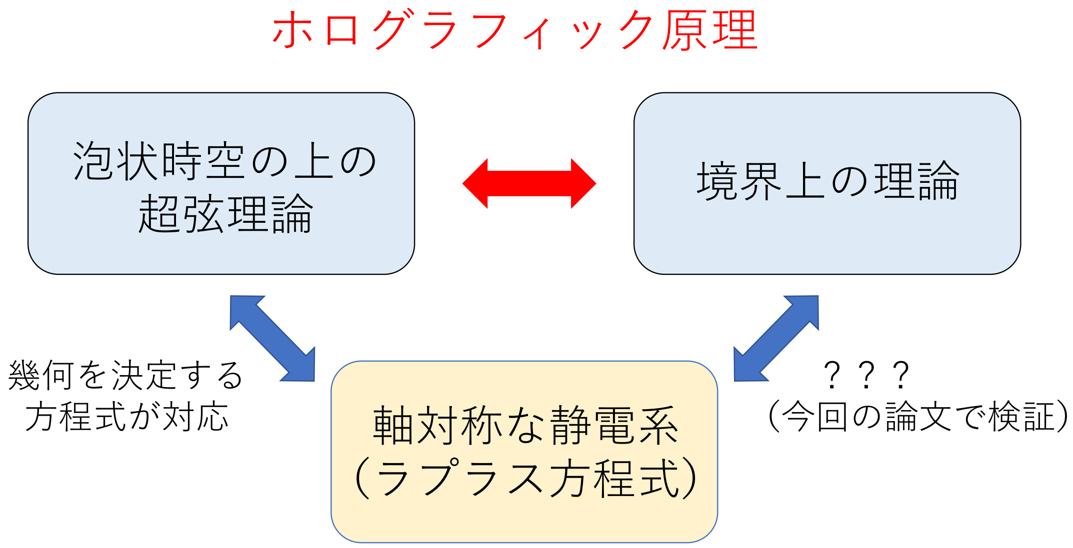

図 2　泡状時空に対するホログラフィック原理

には曲率を持っており、ある一定の割合で曲がっているのです。このような「曲がり具合」が境界からのホログラフィーとして描けるかどうか、というのが今回の研究で考えた問題設定です。

　今回考えた時空は、泡状 (bubbling) 時空と呼ばれる特殊な構造を持ったもので、その名の通り、泡のような幾何学的構造を持ったものです。この場合のホログラフィック原理の関係は図 2 の赤い矢印で示されていて、主張としては「泡状時空の上の超弦理論が、境界上の理論と等価である」というものです。ちなみに、この境界上の理論は論文のタイトルにもなっている plane wave matrix model と呼ばれる理論です。

　この泡状時空と呼ばれる時空は、その幾何（曲がり具合）を決定する方程式が、静電系におけるラプラス方程式と同じ形になるという顕著な性質を持ちます。ラプラス方程式は電磁気学ではお馴染みの式で、大学で物理を勉強したことのある人なら誰でも知っている方程式です。ラプラス方程式はそれ自体、なかなか解くのが難しい式なのですが、それでも超弦理論の幾何の方程式と比べるとかなり優しいものです（前者は線形、後者は非線形な方程式です）。今回考えた泡状時空では、幾何を決める方程式が、ちょうどラプラス方程式の形と等しくなります。つまり、難しい幾何の方程式が、比較的解きやすい形に帰着するという非常に良い構造を持っているのです。この関係が図 2 の左側の青い矢印で示されています。

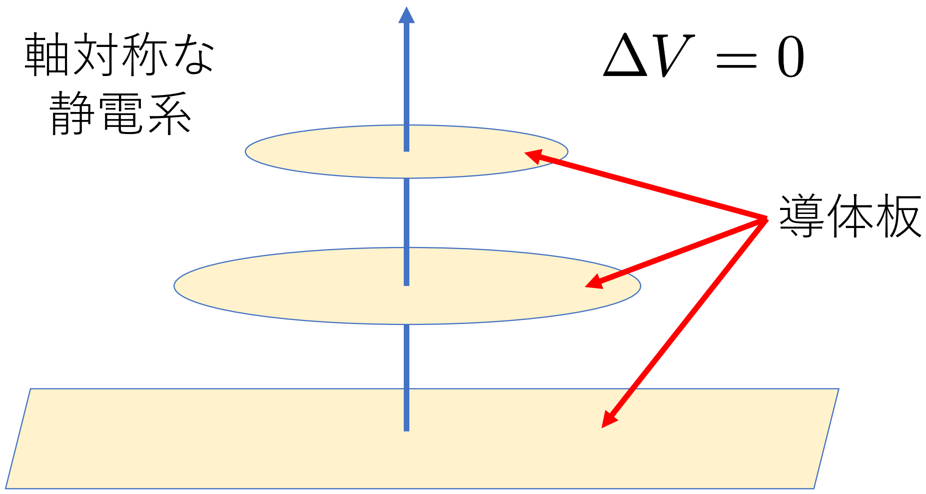

図 3　泡状時空が対応する軸対称な静電系の例

ちなみに図 3 では、泡状時空に対応する静電系の一例が示されています。この系は軸対称で、いくつかの円盤状の導体板が置かれています。このような空間でのラプラス方程式の解を求めると、それを使って超弦理論の時空を構成することができます。ちなみに、円盤の数や位置、大きさを変えることは、泡状時空の泡の構造（時空のトポロジー）を変えることに対応します。

一方で「このような静電系のラプラス方程式が、境界上の理論からも導かれるのか？」というのが本研究で考えられた問題です。これは図 2 の右側の青い矢印に対応します。本研究では境界上の理論を「局所化」と呼ばれる最新の計算テクニックを用いて解析しました。計算の結果、境界上の理論からも、全く同じラプラス方程式が導かれることが分かりました。図 2 の対応関係に基づけば、この結果は「境界の理論だけを使って、時空の幾何を決めることができる」ということを示しています。つまり、ホログラフィック原理が時空の幾何構造に関しても成立していることが明らかになったのです。これが受賞理由となった本研究の主な成果です

ホログラフィック原理を理解する上で、最も重要なことはおそらく「時空の幾何が境界上の理論でどのように記述されているのか」を理解する事だと考えられます。一般相対性理論によると、重力というのは結局のところ幾何の揺らぎであるので、このような幾何と境界上の理論の関係が分かれば、ホログラフィック原理の最も本質的な部分である「なぜ

重力の自由度が余分なものであり得るのか」という問題を理解することができるはずです。今回の研究では泡状時空という特殊な例に限りましたが（それでも無限個の異なる時空を含んでいるのですが)、今後より一般的な場合にこの研究を拡張し、ホログラフィック原理の深い理解を得ることが重要になるのではないかと思います。