

# 量子重力の沼地問題

## ——無矛盾性からの沼地条件導出とその統合

濱田雄太<sup>†</sup> (ハーバード大学 hamadayuta647@gmail.com)

重力の量子化は、素粒子物理学最大の難問の1つとして、長年横たわっている。弦理論やホログラフィー原理を使って、様々な状況下での理解が進んでいるが、未だ完全な定式化には至っていない。

そこで、少し視点を変えて、仮に重力の量子論が完成したとして、我々の世界にどんな示唆があるのか、という問いを考えてみよう。

量子重力理論が完成すれば、時空の曲率が**プランクスケール**にまで大きくなった場合を取り扱うことができる。したがって、インフレーション期以前に存在したかもしれない超初期宇宙の超高温状態や宇宙の始まり、ホーキング輻射によりプランク長さ程度まで小さくなったブラックホールの運命、が分かると期待される。

次に、重力以外のセクターについてはどうだろうか？ すなわち、なぜ我々の世界は標準模型で記述されるのか、暗黒物質の正体は何なのか、**電弱スケール**とプランクスケールの階層性はどこからくるのか、といった疑問に量子重力理論は何か役立つのであろうか？

これらに直接答えることは難しい。ここでは、このような問いに迫るための第一歩として、「量子重力理論は理論の非重力セクターに非自明な制限を与えるか？」を問いたい。

仮に重力を量子化せず、古典的に扱うならば非自明な制限は得られないだろう。プランクスケール以下の低エネルギー有効理論は、古典重力理論と結合した有効場の理論で与えられる。この低エネルギー有効場の理論の立場からは、**アノマリー**を生成しないことにだけ注意すれば、どんな物質場や相互作用を導入しても良い。

ところが、近年の発展により、一見無矛盾だけれども、量子重力と結合できない有効場の理論の集合（沼地 (Swampland) と呼ばれる) が存在し、さらにそのような理論

の数は、量子重力と結合できる有効場の理論の数よりも遥かに多いことが明らかになりつつある。このように、低エネルギーの立場からは一見明らかでない制限を見出すとする研究は、量子重力の沼地問題と呼ばれ、最近研究が進んでいる。もちろん、完全な量子重力理論を手にしにない限り、沼地は確定できないのだが、ブラックホール、弦理論、あるいはホログラフィーが正しいと仮定して、様々な角度から量子重力理論が持つべき性質を議論できる。こうして得られる（あるいは予想される）制限は、沼地条件または沼地予想と呼ばれる。

最近、著者らは、低エネルギー有効理論の無矛盾性条件の詳細を注意深く調べることで、一見明らかでない隠された沼地条件を見出せることを発見した。具体的には、次の2つを考えた。1つ目は、散乱振幅の無矛盾性条件である。場の理論の基本的性質であるユニタリ性や因果性は、散乱振幅がある種の条件を満たすことを意味する。そこから、広いクラスの理論で**弱い重力予想**を示すことができた。2つ目は、理論に存在する**位相欠陥**の無矛盾性である。欠陥の動力学を記述する場の理論が無矛盾に存在することを要請して、元々の理論のゲージ群に強い制限が与えられることが分かった。

さらに、我々は、様々な沼地条件をブラックホールエントロピーの有限性の一般化として理解することも提案した。また、いくつかの沼地条件とブラックホール物理との関係を明らかにした。提案は、これまで独立と思われてきた沼地条件を、より基本的な1つの原理から理解できる可能性を示唆している。

今後の更なる発展により、量子重力理論の隠れた無矛盾性条件、背後にある原理が明らかになっていき、現象論への示唆、あるいは量子重力の定式化そのものへの示唆が得られることを期待する。

### 用語解説

#### プランクスケール：

重力相互作用が強結合になるエネルギースケール。このエネルギー領域を記述するには、量子重力理論が必要と考えられている。

#### 電弱スケール：

電磁相互作用と弱い相互作用が統一されるスケール。ヒッグス場の真空期待値により、特徴づけられる。

#### アノマリー：

理論の対称性が量子論と無矛盾に存在できない現象。ゲージ対称性にアノマリーがある場合は、理論の破綻を意味する。

#### 弱い重力予想：

沼地条件の1つで、重力相互作用による引力が、 $U(1)$  相互作用に基づくゲージ斥力よりも弱いとする予想。少なくとも1つの状態が、 $U(1)$  電荷  $Q$  と質量  $M$  について、不等式  $|Q| \geq M/M_P$  を満たすことを意味する。ここで、 $M_P$  はプランクスケールである。



#### 位相欠陥：

理論の非自明な解で、エネルギーが局在化したもの。トポロジカルに保存する電荷によって安定化している。

<sup>†</sup> 現所属：高エネルギー加速器研究機構