

# 博士論文審査報告書

## 論文題目

Exploration into microscopic nature of spacetimes  
by quantum fields and high-energy particles

量子場及び高エネルギー粒子による  
時空微細構造の探求

申請者

氏名

宮本 雲平

Umpei Miyamoto

専攻・研究指導  
(課程内のみ)

物理学及応用物理学専攻 宇宙物理学研究

2005年 3月

一般相対論は、一般共変性と等価原理をその指導原理として構成される重力理論で、時空の幾何学として重力をとらえる理論である。その理論では、時空は滑らかな4次元リーマン多様体で記述され、重力の効果はその曲率によって表される。ところが量子論的観点から考えると、リーマン多様体としての時空描像は超高エネルギー領域まで正しいとは考えられない。Planckスケール( $\sim 10^{-33}$  cm)付近では時空は量子論的な離散構造を持つと考えられ、多様体としての描像は破綻するであろう。重力以外の基本的相互作用、すなわち電磁・弱・強の相互作用は『相対論的場の理論』を用いてゲージ理論として記述され、その量子化にも本質的問題はない。ところが、重力場の量子化は、繰り込み不可能な発散を含むことが知られ、非常に困難であると考えられている。そこで、高次元時空や超対称性等の概念を導入することにより、繰り込み不可能性を回避し、さらには全ての相互作用を「ひも」の運動から演繹すると言われる『超ひも理論』が「究極の理論」として広く研究されている。また、非摂動的な重力の正準量子化の理論は、近年新しい正準変数を導入することにより急速に発展し、『ループ量子重力』として注目を浴びている。しかし、両理論とも発展途上の段階にあり、ミクロな時空がどのように記述されるかはまだ十分わかっていない。この量子重力理論の構築は現代物理学に残された最大の課題の1つであるが、実際に時空の量子効果が本質的な役割を果たす状況や現象は我々の宇宙に存在するのであろうか。仮に存在するとしたらそれらの現象は観測可能なのであろうか。これらの問いに答えることは「量子重力理論」を構築するためにも取り組まなくてはならない重要な課題であると考えられる。

そのような観点を背景に本論文の著者は次に述べる2つの研究テーマに取り組んでいる。(1)一般相対論における『宇宙検閲官仮説』の問題を『曲がった時空での場の量子論』という手法を用いて量子重力理論が重要となる裸の特異点形成について考察する。(2)時空の量子論的性質を反映していると期待される『非可換幾何学』に内存する物理を抽出し、近年の観測によりその存在が明らかになってきた『超高エネルギー宇宙線』の問題解明に応用する。これら2つの研究を通して、古典物理学だけでは得難い、時空の「微細構造」についての知見を得るのを目的としている。本論文はそれらの研究成果をまとめたもので、8章から構成されている。以下に各章ごとにその概要と評価を述べる。

第1章においては、本研究の主題である裸の特異点と量子効果の問題および超高エネルギー宇宙線に関する概観を与えている。

第2 - 4章は第1の研究成果についてまとめられている。進化の最終段階に至った天体は重力崩壊と呼ばれる激しい収縮を起こし、ある臨界質量を越える天体は際限なく収縮し、一般相対論に従えば、その中心付近に時空曲率や物質密度が発散する『時空特異点』が形成される。しかし、時空特異点の出現は、全ての物理法則の予言能力を消失させる。そこでPenroseは1969年、『宇宙検閲官仮説』を提唱し、「物理的に尤もらしい重力崩壊によって形成される時空特異点はブラックホールの内部に形成され、遠方の観測者に影響を及ぼすことは

ない」とした。しかし、Einstein 方程式の解としてブラックホールに覆われていない時空特異点、いわゆる『裸の特異点』を含むものが多数発見され、かつその反例と考えられる動的古典時空解も見つかっている。それに対し、Ford & Parker は 1978 年、ブラックホール形成において量子論的粒子生成が起こる (Hawking 輻射) ことに着目し、裸の特異点が形成される際の粒子生成について調べ、裸の特異点の半古典的安定性について考察している。それ以後、幾つかの崩壊モデルにおいて同様の研究が行なわれてきた。著者は、まず第 2 章で、『宇宙検閲官仮説』および特異点問題の基礎となる重力崩壊時空における量子論的粒子生成に関するこれまでの研究をまとめている。第 3 章では、裸の特異点が現れる球対称自己相似型重力崩壊を表す時空解を考え、そのような背景時空における量子論的粒子生成についてこれまでの研究をまとめている。自己相似性は重力理論や系のスケール不変性に起因した対称性の一種であるが、宇宙論や天体物理学に於ける多くの宇宙物理的状況においてアトラクターとして振る舞うと期待されている。特に、一般相対論的 Larson-Penston 解はより一般的な球対称崩壊のアトラクターになっていることが示されており、この解は現在最も強力な宇宙検閲官仮説の反例と考えられている。この背景時空において量子論的粒子生成を考えると、粒子生成のエネルギー放射率が特異点出現までの「残り時間」の逆二乗に比例して増大し、特異点出現の時刻に於いて無限大に発散することがわかっている。このことは、量子場から重力場への反作用を考慮したとき、粒子生成が裸の特異点出現を妨げる可能性を示唆し、「半古典的宇宙検閲官」の存在を支持すると考えられる。これまでこのような観点からは系統的な研究があまりなく、この章は著者の研究につなげるという意味でも適切なレビュー論文となっている。第 4 章が著者のオリジナルな研究である。著者は第 3 章の解析で仮定された自己相似性をはずし、より一般的な時空を用い「半古典的宇宙検閲官」の可能性に関して系統的な解析を行っている。背景時空としては Lemaitre-Tolman-Bondi (LTB) 解と呼ばれる圧力ゼロの完全流体 (ダスト) 崩壊を用い、その時空における量子論的粒子生成を解析し、時空特異点の強さと量子放射の量の相関を調べている。この解は、流体の初期密度分布を調節することにより、形成される裸の特異点の『強さ』を 1 パラメータで表すことができるので、相関の解析には適切である。その結果、『強い裸の特異点』形成に於いては放射エネルギーが無限大に発散するが、『弱い裸の特異点』形成に於いては、放射が有限に留まることを明らかにしている。後者の事実は、「宇宙検閲官仮説」復活の為には、量子論的粒子生成以外のメカニズムが必要であることを示唆しており、一般的に「裸の特異点形成に於ける量子放射は崩壊の詳細によらず発散する」というそれまで信じられてきた常識を覆す意味で非常に興味深い。

第 2 のテーマである『超高エネルギー宇宙線』に関しては第 5 - 7 章にまとめられている。近年、 $10^{20}$  eV 程度のエネルギーを持つ超高エネルギー宇宙線が観測され、そのエネルギー起源および伝播のメカニズムに関して広く議論を呼

んでいる。宇宙線物理学の標準理論によれば、このような高エネルギーをもつ粒子は宇宙背景輻射と衝突することにより急激なエネルギー損失を起こし、宇宙論的な距離から地上に到達するのは不可能と考えられている(GZKカットオフ)。この観測結果を説明するには素粒子標準モデルを超えた物理が必要と考える研究者も多く、様々な可能性が議論されている。その可能性として、著者は『非可換幾何学』のモデルである『 $-Minkowski$ 時空』モデルに注目し、このモデルが超高エネルギー宇宙線の謎を解く可能性について調べている。まず、第5章で非可換幾何学の数学的基礎を概観した後、第6章に於いて、 $-Minkowski$ 時空における波束の群速度について考察している。そこで、光子は理論に現れる分散関係の変更にも関わらず、一定の光速度で伝播することを明らかにし、特殊相対論における因果構造がこの非可換時空でも保たれることを示した。第7章では、GZKカットオフを超える超高エネルギー宇宙線および、TeV-線の伝播について議論している。著者は、これらの宇宙線が伝播中に起こすと考えられる素過程を解析し、その反応エネルギーの閾値が上昇するため、超高エネルギーを保ったまま地上に到達することが可能であることを示した。これは、超高エネルギー粒子存在の可能性と特殊相対性理論の拡張を結びつけるものとして注目に値する。

最後の第8章においては、本論文の成果をまとめた後、今後の展望について言及している。

以上が本論文の各章ごとの概要とその評価である。要約すると、著者は本論文において、時空の「微細構造」について量子論的観点から解析し、第一に、『曲がった時空での場の量子論』の手法を用いて一般相対論における『宇宙検閲官仮説』の問題を解析した。第二に、時空の量子論的性質を反映していると期待される『非可換幾何学』に内存する物理を抽出し、それがローレンツ不変性を破る点に注目し、『超高エネルギー宇宙線』の問題解決に応用した。これらの研究から微視的時空構造の新しい側面を明らかにした。このようなミクロ物理学と重力現象を全く新しい観点から解析するという試みは、いまだに完成されていない量子重力理論への新しい足がかりを与えるものとして、今後重要になるものと評価される。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。

2005年3月

#### 審査員

主査	早稲田大学教授	理学博士(京都大学)	前田 恵一
	早稲田大学教授	理学博士(東京大学)	大師堂 経明
	早稲田大学教授	理学博士(早稲田大学)	中里 弘道
	早稲田大学助教授	理学博士(東京大学)	山田 章一