

博士論文審査報告書

論文題目

Colliding branes and its application to
string cosmology

ブレイン衝突とストリング宇宙論への応用

申請者

氏名

高水	裕一
Yu-ichi	Takamizu

専攻・研究指導
(課程内のみ)

物理学及应用物理学専攻・宇宙物理学研究

2007年 7月

ビッグバン膨張宇宙論は、宇宙の膨張、3 K宇宙背景輻射、および原始軽元素の存在などの重要な観測事実により、現代宇宙論の標準的理論となっている。しかしながら、ビッグバン理論には原理的な困難もいくつか残されており、それらを解決すべく提唱されたのがインフレーション理論である。この理論の重要な産物として、インフレーション期の場の量子揺らぎからつくり出されるスケール不変な密度揺らぎがある。これが観測されている宇宙背景輻射の温度揺らぎの起源と考えられるに至り、インフレーション理論は初期宇宙の標準的理論になりつつある。

そのような状況で、宇宙論にはもっと重要な新しい問題が登場した。超新星や宇宙背景輻射などの詳細な観測はビッグバン理論をより強固なモデルにしたが、その一方で、驚くべき発見をもたらした。宇宙構成要素の大半は我々のよく知らない物質であるということである。アインシュタイン理論に基づくフリードマン方程式を用いて解析すると、ダークエネルギー(73%)やダークマター(23%)という未知の“物質”がほとんどを占めている。ダークエネルギーは、宇宙定数や真空エネルギーに似た存在で、現在の加速膨張を引き起こしている。ダークマターは、バリオンではない未知の物質で、銀河などの大規模構造形成に必要不可欠なものと考えられている。現在、これらの“未知物質”(特にダークエネルギー)を説明できる有力な理論はなく、ダークエネルギー問題の解決は、新しい物理学への窓を拓く可能性がある。

これらの新しい物理学の可能性の一つとして素粒子の基本相互作用を統一する理論が考えられる。この究極理論の最有力候補として超弦理論がある。10次元時空でのみ量子異常が消えるので、超弦理論は高次元時空において構成される。そのような理論で我々の宇宙を説明するのにブレーンと呼ばれる3次元膜を用いたブレーン宇宙論が提唱されており、我々は高次元時空中の3次元膜に拘束されていると考えられている。ブレーン宇宙論では、低エネルギー極限で3次元ニュートン重力を再現し、逆に高エネルギー極限ではその変更を予言するので、新しい宇宙像を提供するのではと期待されている。特に、インフレーション理論に代わるブレーン衝突宇宙モデルは新しい初期宇宙モデルとして興味深い。これは2つの真空ブレーンが衝突することにより宇宙を加熱し、ビッグバンが始まるとするシナリオである。このシナリオもビッグバン理論の抱える困難を解決すると予想されている。インフレーションシナリオでは、それを引き起こすスカラー場(インフラトン)の素粒子論的起源がまだ十分に分かっていないのに対し、ブレーン衝突モデルでは、超弦理論から導かれるブレーンを基礎にしており、そのようなモデルを考えるのは自然である。またこれらの新しい宇宙像は、ダークエネルギーの起源を与える可能性も含んでいる。

このブレーン衝突宇宙モデルでは、観測とは矛盾する初期揺らぎが生成されるという問題があり、一部のグループを除きこれまであまり詳しくは研究

されてこなかった。しかし、衝突過程の取り扱いには不確定な要素があり、この結論を確かめるには衝突過程のより詳細な解析が必要と考えられている。また、ブレインは開弦の端点として定義される超弦理論における重要な構成物であり、非摂動効果を考えるときには重要な役割をすると考えられているので、その衝突の詳細な解析は超弦理論を基礎にした宇宙論の研究において必要不可欠な基礎過程と考えられる。

本論文では、このブレイン衝突の重要性に着目し、高次元ブレイン宇宙モデルにおけるさまざまな課題について系統的に研究している。本論文は7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章で本研究の背景についての概略を述べた後、前半部の第2章から第4章まではこれまでになされてきた関連する研究をまとめている。第2章ではビッグバン理論とその困難な点および、それらのいくつかを解決するインフレーション理論について解説し、さらにはダークエネルギーという現代宇宙論最大の問題に触れている。第3章では素粒子統一理論としてもっとも有望な超弦理論、およびそれを基礎にしたブレイン宇宙モデルについてまとめている。第4章では、本研究の背景となるブレイン衝突宇宙モデルについて詳述している。

第5章以下が著者のオリジナルな研究である。研究は主に2つに分けられる。一つはミンコフスキー時空を背景とした研究（第5章）で、もう一つは重力の効果を考慮し、曲がった時空の発展を含めたブレイン衝突ダイナミクスの研究（第6章）である。本研究を通して、ブレインはスカラー場で構成されたドメインウォールと呼ばれるソリトン解として扱われている。それは、ブレインを厚みのない特異膜とするとブレイン上のミクロな物理過程などが議論できないからである。

第5章では、まずブレイン衝突そのものの解析を行っている。重力を無視した場合についてはP. Anninosらによって4次元時空の場合に解析がなされており、著者の結果はそれを再確認したものになっている。衝突過程は、ブレインの衝突速度によってバウンス回数などが大きく変わり、複雑な現象を示す。

著者はさらに、この衝突過程を基礎にして、衝突に伴う宇宙の再加熱過程を調べている。衝突によってドメインウォールを構成するスカラー場が変動し、これと結合するブレインに拘束された粒子を考えると、変動する結合項を通して量子論的に粒子対生成が起こる。その結果、再加熱に必要な宇宙温度を実現することが十分に可能であることを示している。これは、ブレイン衝突宇宙モデルにおいて期待されていたことではあるが、定量的に確認したという意味で非常に重要である。

ブレイン宇宙論では、フェルミ粒子などの標準粒子はブレインに拘束されている。そのようなモデルは、5次元フェルミ粒子をドメインウォール上で考えることで構成できる。湯川結合によってカイラリティを持ったフェルミ

粒子はドメインウォール上に拘束される。著者は、まず簡単なミンコフスキー背景時空中のブレイン衝突を考え、ブレイン上に拘束されていたフェルミ粒子が衝突でどれほど反対のブレインに移るか、あるいは余剰次元に逃げていくかについて解析している。片側のブレインにのみフェルミ粒子が局在し、もう一方が真空のときは、衝突により、一部が真空ブレインに移る。その量は衝突速度や結合の強さに依存して大きく変わる。一方、両ブレイン上に同量のフェルミオンがある場合は、これらのパラメータに関係なく同量が入れ替わり、衝突後も等量のフェルミオンがブレイン上に残る。これらの研究はブレイン衝突によって我々の宇宙の物質がどのように振る舞うかを最初に示したものとして非常に評価できる。

第6章では、相対論的重力を考えることで、重力の影響を評価している。この場合、ブレイン宇宙モデルで重要な漸近的反ドジッター時空を境界条件として用いている。また、素粒子統一理論で期待される超重重力理論を基礎としてモデル構成をしている。具体的には、衛藤らや新井らによって得られた自己重力を含めたドメインウォール解を用いて衝突を解析している。数値的な解析の結果、重力の影響が大きくなると平坦時空の場合と異なり、衝突により現れる場の揺らぎが不安定になり、時空特異点が衝突後に形成されることを明らかにしている。さらに著者は、重力の効果や衝突速度が大きい場合、ブラックブレインが形成されるが、特異点は事象の地平線に隠され、我々の宇宙には影響を与えないことを示している。これはこれまでのブレイン衝突の描像を大きく変える可能性があり重要な成果と考えられる。

最後に第7章で、本研究で得られた結果について総括し、今後の展望についてまとめている。

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、本研究では、超弦理論やM理論を基礎にしたブレイン衝突宇宙モデルにおいて重要なブレイン衝突の基礎過程の系統的な解析を行い、その重要性を明らかにしている。本研究は、素粒子統一理論に基づいた初期宇宙のシナリオに新しい描像を導入するもので、これからの宇宙論研究において新しい展開が期待できるものとして十分に意義深いものと評価される。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。

2007年6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（早稲田大学）	大場 一郎
	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	博士（理学）東京大学	山田 章一