

博士論文概要

論文題目

Colliding branes and its application to
string cosmology

ブレーン衝突とストリング宇宙論への応用

申請者

氏名

Yuichi

Takamizu

高水

裕一

専攻・研究指導
(課程内のみ)



2007年 5月

超新星や宇宙背景輻射などの詳細な観測から、宇宙年齢、現在の宇宙のエネルギー密度などが正確にわかってきた。驚くべきは、その構成要素として宇宙は我々が通常知っているものでは説明できないもので満たされていることである。現在の宇宙は、一様等方時空の仮定に基づくフリードマン方程式で解釈すると、ダークマター、ダークエネルギーという未知なる構成物質が9割以上をしめていることが確かになってきた。ダークエネルギーは、宇宙項や真空のエネルギーと似て、現在の加速膨張を引き起こしているものであり、およそ40億年前の太陽系誕生以降からゆっくりと宇宙を加速させている。ダークマターは、重力のみが作用するバリオン起源ではない物質で銀河団等の宇宙の大規模な構造を形成させるのに必要不可欠なものである。ダークエネルギーは、フリードマン方程式の物質項としたとき圧力が負となる奇妙な物質になるが、これは逆に方程式そのものの変更さらには新たな理論への窓となる可能性もある。さらにもし真空のエネルギーだとすると宇宙誕生時点の137億年も前にその値が決定された可能性もありこのような初期宇宙の物理過程との関係があるかもしれない。初期宇宙の物理は、元素合成期以上の高温期にはまだ明確ではなく自然界の力の統一理論の観点からも非常に興味深い。その意味ではダークエネルギーの問題は重力理論の問題だけにとどまらず素粒子理論との統一にも重要な要素となってくるかもしれない。一方、現在の宇宙の大規模構造は、通常こういった宇宙初期のインフレーションと呼ばれる加速膨張期に生成された量子揺らぎの種が重力により成長したものだと考えられている。インフレーションは、ビッグバン宇宙の前に起り、その後再加熱という宇宙の温度を高温にもどすメカニズムをへて輻射優勢なビッグバン宇宙に移行する。予言される初期揺らぎのスペクトルと観測との整合性も高く、現在これらを含めて宇宙論の標準理論と考えられている。この観点からもインフレーションによる揺らぎの種を早い段階から重力的に集めて現在の大型構造をつくるには、宇宙初期からダークマターが存在している必要があり、これも高エネルギー物理を探る重要な可能性を秘めている。現在の宇宙の未知なる構成要素を探ることは、初期宇宙に現れる相互作用の統一理論と無縁ではなく、標準理論を越えた理論が必要かもしれない。

究極理論の研究において、超弦理論は現在知られている唯一の重力を含む量子化された素粒子統一理論の候補である。超弦理論は高次元理論で、10次元でのみ量子異常がないことが知られている。その最近の進展として、我々の宇宙はこの高次元中のブレーンと呼ばれる膜の上にあるとするシナリオが盛んに研究されている。ブレーンモデルでは低エネルギー極限で4次元ニュートン重力を再現し、かつ高エネルギー極限で、その変更を予言するので、初期宇宙のような高エネルギー期での理論的研究にとって大変興味深いものである。さらにブレーンモデルでは、将来の加速器実験でのブラックホール生成によって高次元の情報が得られる可能性もある。このようにブレーンを用いた宇宙論は現在、非常に多くの人に

注目されているが、このシナリオではインフレーションに代わる新しい初期宇宙像としてブレイン衝突宇宙モデルというものがある。これは2つの冷たいブレイ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がある。このシナリオでもビッグバン理論の抱える問題点をインフレーションと同様に解決しているため、世界中で注目されている。さらにインフレーションシナリオでは、それをおこすスカラー場の起源が不明確であるのに対して、ブレインモデルでは、その運動によってより自然に説明するのでこの立場からもブレイン衝突宇宙は大変意味のあるものだといえる。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み上述の未知なる構成要素の解明に繋がるかもしれない。しかし、従来のブレイン衝突宇宙モデルでは、観測と合う初期揺らぎが生成されない問題があった。ただこれには衝突そのものの不定性が大きく衝突過程の研究はこのシナリオにとって鍵となる。一方ブレインは開弦の端点として定義されるが、超弦理論ではソリトンという非摂動効果に対応し弦と同様に重要な構成要素であると考えられている。このブレインは高次元宇宙では多く存在していたので、その衝突も超弦理論の宇宙進化にとっては一つの重要な現象であるといえる。我々の世界がなぜ4次元時空であるか？という次元問題にもこのブレイン同士の衝突過程から説明できるとする研究もありブレイン衝突の研究の意義は大きい。

本論文では、このブレイン衝突に着目しこういった初期宇宙のさまざまな問題への応用を研究した。形式的に以下、平坦な時空（5章）、曲がった時空（6章）での研究として分類し5章で衝突と再加熱機構の研究（5-1）衝突に伴うフェルミオンの研究（5-2）6章で自己重力が入った衝突（6-1）衝突とブラックブレイン形成（6-2）ブレイン衝突と次元問題（6-3）という順番でその内容を要約する。まず5章ではブレインの衝突に伴う粒子生成によって宇宙が十分再加熱されるかどうかを明らかにした（5-1）。ブレインは高次元中にある厚さがないデルタ関数的な面であるとする、その衝突過程は議論できない。そこでブレインのモデルとしてスカラー場でできたドメインウォールと呼ばれるソリトン解を扱った。ドメインウォールは、ある空間内にエネルギーが局在しているという意味でブレインのソリトンの描像を示すモデルだと考えられる。重力的な効果を考えない簡単な場合についてはその衝突過程はアニソスらによって研究されていて本研究の衝突過程の解析はこれを参考にした。衝突過程は、ウォールの初速度によって衝突回数は大きく変化し、ソリトン衝突の他の研究にみられる複雑な現象が確認できる。さらにこの衝突によってドメインウォールをつくっているスカラー場が変動するのだが、これをもとに結合する別のスカラー場を量子化して粒子生成を議論した。その結果パラメータ依存性はあるが、再加熱に必要な生成温度を実現することが十分に可能であることがわかった。さらに湯川結合によってこの上に拘束されたフェルミオン場を組み込むができる（5-2）。ブレインモデルはその上に標

準粒子（フェルミオン）が拘束されているものを考えているので、その意味で衝突過程によってこの場がどのような影響を受けるかを研究することは重要である。簡単な平坦時空の場合、ブレーン上に拘束されていたフェルミオン場が衝突でどれほど反対のブレーンに移るか、あるいは余剰次元（5次元方向）に逃げていくかについて解析した。結果は余剰次元方向に逃げるモードは初速度が大きいほど、こぼれていきやすいことがわかった。さらに反対のブレーンにどれほどが移るかは、片側のブレーンにのみフェルミオンがあり、もう一方は真空ブレーンのときには、その衝突にかかる時間と結合の強さの周期関数であることが分かった。これに対し両側のブレーン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衝突後も等量が両ブレーンに残ったままであった。

さらに自己重力を考えた場合の衝突についても議論した（6-1）。衛藤らの自己重力も含めたドメインウォール解を用いて解析した。ドメインウォールの衝突は、時空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生成された場の揺らぎが不安定になることがわかった。これにより衝突後この宇宙モデルでは特異点が形成されてしまう。また衝突による宇宙の発展も、このモデルでは期待していたビッグバン宇宙にはつながらないことがわかった。しかし、この研究により重力の効果で今までのブレーン衝突の描像は大きく変わり衝突で高次元のブラックホールが生成される可能性があることがわかった（6-2）。時空の効果が大きい場合や、ウォールの速度が大きい場合はブラックブレーンと呼ばれる高次元ブラックホールが生成される。このブラックブレーン形成は他にも新井らの **BPS** という安定なブレーン解でも同様にできることも示した。さらに宇宙初期のブレーン衝突により次元問題を解決するモデルについても研究した（6-3）。基本的なアイデアは10次元中のストリングの衝突によって4次元時空が膨張、残りがコンパクトなままというものである。このシナリオではストリングの熱平衡性が重要であった。しかしこの熱平衡の仮定が実は保たれていないことが指摘されていた。そこでこの熱平衡性をどのように実現するかを考察した。

このようにブレーン衝突現象を通して超弦理論を基にした宇宙論へのさまざまな応用を研究してきた。再加熱機構としては十分可能な生成温度を実現し、フェルミオンの挙動に関してはまず、第一段階として低エネルギーフェルミオンの効果で衝突に伴い反対のブレーンに飛び移ることが明らかになった。この高エネルギーの場合の解析は今後の課題であるが、この効果で宇宙のバリオン非対称性、つまりは物質の起源をめぐる初期宇宙の重要な問題にせまれる可能性を含んでいる。さらに自己重力の効果も重要であることも示した。とくに衝突によりブラックホールが形成されることがわかり、これらが進化し長くなるとグレゴリーラフラム不安定性という不安定性を起こし細かくちぎれることが知られている。もしこれが起ると高次元のブラックホールが多量にできる可能性が示唆される。これをふまえ超弦理論の宇宙進化にどのような影響があるかも今後の課題である。

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者 (申請者含む)
○論文	<p>Dynamics of colliding branes and black brane production (Physical Review D75 061304 (2007) 1-5) 高水裕一、工藤秀明、前田恵一</p>
○論文	<p>Fermions on colliding branes (Physics Letters B647 1 (2007) 1-7) G.Gibbons、前田恵一、高水裕一</p>
○論文	<p>Thermal equilibrium of string gas in Hagedorn universe (Physical Review D74 103511 (2006) 1-17) 高水裕一、工藤秀明</p>
○論文	<p>Collision of domain walls in asymptotically anti de Sitter spacetime (Physical Review D 73 103508 (2006) 1-13) 高水裕一、前田恵一</p>
○論文	<p>Collision of domain walls and reheating of the brane universe (Physical Review D 70 123514 (2004) 1-12) 高水裕一、前田恵一</p>
講演 (学会)	<p>Fermions on colliding branes (日本物理学会, 東京 2007年3月26日) 高水裕一、前田恵一</p>
講演 (研究会)	<p>Fermions on colliding branes (第16回「一般相対論と重力」研究会, 新潟 2006年12月1日) 高水裕一、前田恵一</p>
講演 (学会)	<p>ハゲドロン領域での初期宇宙・熱平衡の実現とその応用 (日本物理学会, 奈良 2006年9月23日) 高水裕一、工藤秀明、斉藤俊</p>
講演 (国際会議)	<p>Thermal equilibrium of string gas in Hagedorn universe (Brane-world Gravity Progress and Problems, Portsmouth, UK, 2006年9月20日) 高水裕一、工藤秀明</p>
講演 (学会)	<p>漸近的 AdS 時空におけるドメインウォールの衝突 (日本物理学会, 愛媛 2006年3月29日) 高水裕一、前田恵一</p>

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 (研究会)	Collision of domain walls in asymptotically anti de Sitter spacetime (3 rd 21st Century COE Symposium: Astrophysics as Interdisciplinary Science, 東京 2005 年 9 月 1 日) 高水裕一、前田恵一
講演 (国際会議)	Collision of domain walls in asymptotically anti de Sitter spacetime (COSMO-05 International Workshop on Particles and the Early Universe, Bonn, Germany, 2005 年 8 月 31 日) 高水裕一、前田恵一
講演 (国際会議)	Collision of domain walls in asymptotically anti de Sitter spacetime (Albert Einstein Century Conference, Paris, France, 2005 年 7 月 21 日) 高水裕一、前田恵一
講演 (国際会議)	Particle production in a two-brane collision and reheating of the universe (Yukawa International Seminar 2005 , 京都 2005 年 6 月 28 日) 高水裕一、前田恵一
講演 (学会)	ブレイン衝突に伴う再加熱機構 (日本物理学会, 千葉 2005 年 3 月 25 日) 高水裕一、前田恵一
講演 (研究会)	Particle production in a two-brane collision and reheating of the universe (第 14 回「一般相対論と重力」研究会、京都 2004 年 12 月 3 日) 高水裕一、前田恵一
講演 (学会)	ブレイン衝突に伴う再加熱機構 (日本物理学会, 高知 2004 年 9 月 29 日) 高水裕一、前田恵一
講演 (国際会議)	Collision of domain walls and reheating of the brane universe (COSMO-04 International Workshop on Particles and the Early Universe, Toronto, Canada 2004 年 9 月 20 日) 高水裕一、前田恵一

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）