Affleck-Dine baryogenesis, Q-balls and braneworld

松田　智裕　（埼玉工大）[1]

宇宙項の問題や重力の量子化、究極の統一理論を考える上で、次元の拡張はこれらの問題を解決する上での最も重要な候補の一つです。しかしながら、次元の拡張から予想されうる理論はあまりにも広大でそのままでは手がつけられません。やや前にＳｔｒｉｎｇ理論がもてはやされた理由の一つとして、こういった次元拡張を非常に扱いやすい形で制限し、具体的な計算が可能なモデルを数多く提供したことが挙げられると思います。

しかしながら、以前のＳｔｒｉｎｇ理論では内部空間はつるつるでした。ほとんど何もない空間をただコンパクト化していただけだったので、いくら扱いやすくなったと言っても制限があまりにもきつすぎたということは否定できません。

その後に現れたブレーン理論は、この「つるつるの内部空間」に「骨組み＝ブレーン」を入れたうえで、扱いやすい枠組みを提供してくれました。　ブレーンを入れることによる理論の拡張は非常に多種多様で、さらなるステップに向けての次元拡張の重要な足がかりを与えてくれるものでした。

しかしながら、これは「物理」の話なので、どんなモデルでも野放図に許すという訳にはいきません。ブレーン理論が多種多様であるほど、何らかの形で観測から制限を置く必要が出てきます。このトークでは、このようにブレーン理論のモデルに制限を置こうとする取り組みの一つとして、宇宙論からの制限と宇宙観測によるブレーンの「痕跡」の発見に繋がるかもしれない試みについて考えます。宇宙論からの制限の中には、インフレーションモデルの構築という非常に重要なトピックもありますが、ここではブレーンモデルに特有な Cosmological Defect を視野に入れながら、Affleck-Dine メカニズムによるバリオン数の生成を考えてみたいと思います。

まずはバリオン数生成のためのメカニズムと現象論的な GUT モデルとの関係を見直しながら解説してみましょう。表にそれぞれの対応を示します。

Model\ Mechanism	X-decay	AD	leptogenesis
SUSY-GUT	**A**	**B**	**C**
Large extra dim.	**D**	**E**	**F**

- **A** SUSY-GUT での GUT baryogenesis (重い X 粒子の非平衡崩壊 X→ ql, qq)
  この場合、単純な温度効果しか考えないと、必要量の重い粒子をどうやって生成するかという問題が Gravitino 問題と矛盾してしまいます。しかしながら、重い粒子を生成しつつ Gravitino 問題は回避するという解決方法は数多く提案されています。

- **B**　SUSY-GUT での Affleck-Dine baryogenesis
  問題点の例として Q-ball の寿命が長くなりすぎてバリオン数が正しく生成されない場合や、温度効果によって Affleck-Dine 場の適切な振動が妨げられるなどの場合がありますが、これらの問題にも解決策は数多く存在しています。

- **C**　SUSY-GUT での leptogenesis
  様々な場合について、GUT 粒子の崩壊を考えるよりも良い結果が期待されています。

[1]e-mail: matsuda@sit.ac.jp

- **D** LED (Large Extra Dimension) モデルにおける GUT baryogenesis
  この場合は「重い粒子」が重くなれない ($M_X < M_*$)、陽子崩壊を抑制するメカニズムがバリオン数生成に必要なバリオン数の破れと拮抗する、など様々な問題が発生します。そのため、$M_* \ll M_{GUT}$ の場合には「真空ではバリオン数が非常に小さく抑制されているけれどバリオン数生成時にはバリオン数の破れが極端に増幅されている」といった条件を満たす必要があります。そのため、我々はこの条件を満たすための状況設定として Defect を考えることにしました。[2]

- **E** LED モデルにおける Affleck-Dine baryogenes
  この場合にも深刻な問題が発生します。我々が住んでいるブレーン上の MSSM(Minimal Supersymmetric Standard Model) の Flat 方向を使って Affleck-Dine baryogenes を起こそうとしても十分な量のバリオン数を生成することは出来ません。解決策は現在以下の２種類が知られています。

  - AD after thermal brane inflation(Matsuda)[3]
  - AD field is a bulk field(Mazumdar)[4]

  この会議では上の解決策について解説しました。

- **F** Leptogenesis と LED.
  この場合、以下の二つの要求が矛盾してしまいます。

  - Sphalerons cannot be activated if ($T_{RH} < T_{EW}$)
  - Small $M_* \rightarrow$ small $T_{RH} (T_{RH} < T_{EW})$

  つまり、折角レプトン数を生成してもそれをバリオン数に生成できないという問題が発生します。この解決策としては、Sphaleron 以外のメカニズムを考えるか、Sphaleron を低い温度で励起するかいずれかの方法を考えなければなりません。[5]

全体像を紹介したところで、次に LED モデルでの Q-ball について考えてみましょう。ここでは Q-ball を構成する具体的なブレーンの配位がある場合について考えます。具体的には、重いブレーンの集合の周りを軽い反ブレーンが回転しているような状況を考えましょう。このモデルを有効理論で見てみると、たしかに Q-ball の前段階である Field の (回転) 振動を正しく再現しているように見えます。

---

[2] T.Matsuda, "Enhanced baryon number violation due to cosmological defects with localized fermions along extra dimension", Phys.Rev. D65 (2002) 107302 [hep-ph/0202258]; T.Matsuda, "Baryon number violation, baryogenesis and defects with extra dimensions", Phys.Rev. D66 (2002) 023508 [hep-ph/0204307].

[3] T.Matsuda, "Affleck-Dine baryogenesis after thermal brane inflation", Phys.Rev. D65 (2002) 103501 [hep-ph/0202209].

[4] A. Mazumdar and A. Perez-Lorenzana, "Affleck-Dine baryogensis in large extra dimensions", Phys.Rev. D65 (2002) 107301 [hep-ph/0103215].

[5] T.Matsuda, "Activated Sphalerons and Large Extra Dimensions", Phys.Rev. D66 (2002) 047301 [hep-ph/0205331].

しかしながら、これと全く同じ構成は”Branonium”[6]として既に議論されていて、Q-ballで考えられたような運動エネルギーの局在化は起こらないとされていました。それでは、どちらが正しいのでしょうか？答えは非常に単純です。“Branonium”の議論では、回転運動の角運動量が空間方向に均一であるという「仮定」をおき、その仮定の下で半径方向の摂動に対する運動の安定性を調べていました。この場合、Q-ballの生成に必要な角運動量の局在化が仮定の段階で排除されており、結果として回転運動は安定に見えざるを得ませんでした。もちろん”Branonium”の議論は明らかに間違えており、“branonium”は不安定でQ-ballに崩壊すると考えるのが妥当です。

我々は、このQ-ballに着目し、「ブレーン由来のQ-ball」と「通常のQ-ball」とで区別する方法がないかどうか研究しました。アイデアは非常に単純です。ブレーン由来のQ-ballは電荷を持った物体の回転運動なので、Bulkへの輻射があります。この輻射が通常の崩壊より大きくなる状況が存在すれば、ブレーン由来のQ-ballを区別することが出来るはずです。

結果として、いくつかの例で「区別することが出来る」という結論を得ました。[7]

Q-ballに限らず、さまざまな宇宙論的な問題をBraneの言葉で考えたときにこれまで予想されなかった現象が期待されるということは非常に興味深いことです。今後は「ブレーンの証拠」を追い求めて、宇宙を見上げることが当たり前になるかもしれません。

[6]C.P. Burgess, P. Martineau, F. Quevedo, R. Rabadan, “Branonium”, JHEP 0306 (2003) 037 [hep-th/0303170]

[7]T.Matsuda, “Brane Q-ball, branonium and brane Q-ball inflation”, JCAP 0410 (2004) 014 [hep-ph/0402223].