

論文の内容の要旨

論文題目: Matter-Antimatter Asymmetry from MSSM Flat Directions

(超対称標準模型に存在する平坦方向からの物質-反物質の非対称性生成)

氏名 藤井 優成

最近の WMAP の結果は、宇宙に存在するバリオン非対称性 (物質-反物質の間の非対称性) と暗黒物質の量を非常に精度良く計測することに成功した。

$$\Omega_B h^2 = 0.0224 \pm 0.0009, \quad \Omega_{DM} h^2 = 0.1126^{+0.0161}_{-0.0181}.$$

これら二つの量を説明することは、素粒子論、宇宙論にまたがる基本的な問題であるが、これらはともに標準模型の中では説明することが不可能であり、必然的に標準模型を超える物理を要求する。とくにバリオン非対称性に関してはバリオン数を破る相互作用が必要であり、陽子崩壊が観測されていないことに抵触しないためには高エネルギーの物理に頼る必要がある。これまでに、様々な模型が提唱されているが、基本的にはこの要請の為に将来において検証可能な低エネルギー領域になんら予言を持たないものがほとんどである。

ここでは、枠組を超対称標準模型に限ることによって、将来における実験から宇宙の物質の起源について何らかの情報が引き出せないかを考えることにする。超対称性はボソンとフェルミオン間の対称性であるため、標準模型に超対称性を導入するとバリオン数やレプトン数を持つスカラー粒子、スクォークやスレプトンが現れる。さらに、超対称標準模型のスカラーポテンシャル中には、繰り込み可能な範囲では完全に平坦な方向がある。これらの方向は、スクォーク/スレプトンの適当な組合せで表現され、soft SUSY-breaking mass term と呼ばれる超対称性を弱く破る weak スケールの質量項以外には、繰り込み不可能な高次の相互作用項を除いてポテン

シャルが存在しない。これらの平坦方向を利用したバリオン非対称性の生成機構は Affleck–Dine (AD) baryogenesis と呼ばれ、1985年に Affleck と Dine によって提唱された。宇宙初期における Inflation 中には、そのポテンシャルエネルギーによって超対称性は大きく破れており、この為にスクォークやスレプトンは平坦方向にそって非常に大きな期待値を持つことが出来る。これら平坦方向のその後の coherent な振動は非常に効率良くバリオン非対称性を生成するが、これが AD baryogenesis の基本的なアイデアである。

この機構をより詳しく調べて、その低エネルギーの予言を調べるのがこの論文の主題である。最近の大きな発展は、Q-ball と呼ばれる non-topological soliton が AD baryogenesis 中に生成されることである。これは、近年の lattice simulation によっても確認された。平坦方向の coherent な振動はその後の instability の成長に伴い Q-ball に分解し、空間的に極在してしまう。Q-ball 内部は外部の熱浴から遮蔽され、Q-ball は非常に長寿命になる。ここで極めて重要になるのは、Q-ball 崩壊時期の宇宙の温度である。AD baryogenesis で生成される典型的な Q-ball の崩壊温度は、 $T_d \lesssim \mathcal{O}(1)$ GeV であるため、Q-ball を構成するスクォークの崩壊物は熱平衡に達することができない。これが、物質と暗黒物質の起源を繋ぐ重要な架け橋となる。

超対称性標準模型に含まれる暗黒物質候補は、neutralino と呼ばれる中性粒子であるが、これは一般には、Bino と Wino と Higgsino の線形結合である。通常の宇宙の熱史の中においては、Bino-like な lightest neutralino が観測で要求されている暗黒物質の量を供給できる。この場合、暗黒物質の量は Bino の質量と対消滅断面積のみで決定され、初期宇宙の情報はなんら残されていない。しかし、宇宙の物質の起源が AD baryogenesis であれば、非常に低温度において Q-ball の崩壊に伴う大量の neutralino の供給が有るために、neutralino の性質には Bino とは大きく異なるものが要求される。実際、この場合には対消滅断面積の小さな Bino では暗黒物質を多く作り過ぎてしまい、AD baryogenesis の一般的な問題だと考えられていた。

私は濱口と共に、この問題の最も自然な解として Higgsino- あるいは Wino-like な lightest neutralino を提案した。これらは Bino-like なものよりはるかに大きな対消滅断面積を持ち、その最終的な量はその初期値ではなく、Q-ball の崩壊温度で決定される。典型的な Q-ball の崩壊温度において、これらは要求される暗黒物質量を自然に供給することを発見した。これらの新しい暗黒物質候補は、通常の thermal freeze-out シナリオを仮定すると、その大きな対消滅断面積の為に暗黒物質にはなりえない。したがって、Higgsino- あるいは Wino-like な暗黒物質の発見は、宇宙の物質-反物質の非対称性、さらに暗黒物質の起源について非常に重要な手がかりを与えてくれる。

濱口、それにつづく伊部との共同研究においては、これら新しい暗黒物質候補の将来における検出可能性を詳しく調べた。直接検出実験では、neutralino と Ge などの物質との弾性散乱を利用する。この実験では、neutralino とクォークの相互作用の強さが検出率を決定するが、Higgsino、Wino は共に Bino に比べてクォークとの大きな結合を持ち、特に、Higgsino-like な暗黒物質は特殊な場合を除き非常に大きな検出可能性を持つ。EDELWEISS、CDMS、GENIUS 等の将来

実験において、パラメータ領域のほぼ全体をカバーできることを確かめることができた。

これら一連の研究では、いくつかの有望な間接検出実験についても議論した。neutralino の対消滅から直接生じる光子は neutralino 質量とほぼ同じエネルギーを持ち、さまざまな background から容易に区別できると同時に、暗黒物質粒子の質量という重要な情報を与えてくれる。通常考えられているように Bino が暗黒物質を構成していた場合には、その対消滅断面積の小ささからこの検出は非常に困難なことが知られていたが、AD baryogenesis が予言する Higgsino あるいは Wino が暗黒物質であった場合には、その断面積の大きさから将来の Air-Cherenkov Telescope Array 実験において、かなりの検出可能性が期待できることを示した。特に、Wino-like な暗黒物質の場合には非常に有望な検出方法を提供してくれる。もう一つの重要な間接検出実験として、太陽中心に蓄積した neutralino の対消滅から生じる高エネルギーのニュートリノの検出が存在する。いわゆる solar neutrino のエネルギーは MeV 程度であり、この高エネルギーニュートリノとは容易に区別可能である。太陽の neutralino 捕捉率は Z ボソンを媒介する axial-vector 相互作用で決まるが、これは Higgsino にとって非常に好都合であり、ANTARES、ICECUBE 等の現在建設中の実験において、ほぼ全パラメータ領域をカバー出来ることを明らかにした。

このように、AD baryogenesis から予言される新しい暗黒物質候補は、通常考えられている Bino neutralino よりずっと大きな検出率を持ち、将来区別可能なことが期待出来るが、このシナリオはさらにもう一つ重要な観点を与えてくれる。先に述べたように、このシナリオでは、宇宙のバリオン非対称性と暗黒物質が共にスクオーク condensate の崩壊で生成されるために、それらの量の間になんらかの関係があることが期待できる。私は柳田と共に、あるクラスの AD baryogenesis では、実際にバリオン数と暗黒物質の量の比が低エネルギーの物理量だけで書けることをしめした。この関係式は、スクオークの質量と neutralino の質量と対消滅断面積で表すことができ、Inflation の再加熱温度や、平坦方向の初期値など高エネルギーのパラメータとは独立に決まる。 $\Omega_B h^2$ と $\Omega_{DM} h^2$ の値の近さはこれまでずっと謎であったが、このシナリオはこの問題に関する一つの解釈を与えてくれる。