

これまでの研究成果のまとめ

氏名：小川 達也

古典場の理論を考えた時、場の非線形効果により、エネルギーが有限領域に局在化するような解が実現しうる。これをソリトン解と呼ぶ。ソリトン解は大きく2種類に分類される。1つ目は位相欠陥とも呼ばれる「トポロジカルソリトン解」であり、2つ目は「ノントポロジカルソリトン解」と呼ばれる、理論の対称性に付随した保存量により、安定性が特徴付けられるソリトン解である。ここで述べたようなソリトン解はどちらのタイプであっても、宇宙物理学への応用が考察されている。例えばノントポロジカルソリトン¹はダークマターの候補と考えられている。

応募者はこれまで、Python や Mathematica を用いた数値計算により、古典場の理論に基づき、

$$\mathcal{L} = -g^{\mu\nu}(D_\mu\phi)^*(D_\nu\phi) - g^{\mu\nu}(D_\mu\psi)^*(D_\nu\psi) - \frac{\lambda}{4}(|\phi|^2 - \eta^2)^2 - \mu|\phi|^2|\psi|^2 - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \quad (1)$$

というラグランジアンで記述される理論に着目し、様々なソリトン解を構成するとともに、それらの宇宙物理学への応用を試みてきた。応募者たちが提案したこのモデルは、

1. 大域的 U(1) 変換不変性をもつ複素スカラー場 ψ の理論を考える。
2. U(1) ゲージ場 A_μ を導入することで、局所的 U(1) ゲージ不変性をもつ理論へと拡張する。
3. 対称性を自発的に破るポテンシャルを持つ複素ヒッグス場 ϕ を導入する。

という流れで構築されており、ゲージ理論の枠組みにおける自然な拡張の中で得られるものであると言える。そのような”自然な理論”であるにも関わらず、ノントポロジカルソリトン解のような特殊な解が現れる、ということ²を明らかにしてきた。

上記のモデルにおける球対称ノントポロジカルソリトン (以下 Q-ball) について、宇宙物理的に興味深い、巨大質量の Q-ball に注視解析を行った。結果、本研究で考えるモデルでは、Q-ball 内部の状態方程式により、大きく分けて以下のような3種類の特徴的な解が存在することを示した。

- ダストボール：Q-ball 内部のエネルギーは有限だが、圧力はほぼ0となる。
- シェルボール：Q-ball 内部のエネルギーも圧力も0となる (球殻状の解)。
- ポテンシャルボール：Q-ball 内部のエネルギーと圧力の比が-1となる。

これらの解の内、ダストボールとシェルボールについては無限に巨大な質量を持ち得る、ということ³を解析的に明らかにした。

さらに応募者は、重力場を結合させることで得られる、ボソン星と呼ばれる解を構成した。この時、プランクエネルギーと対称性の破れるエネルギースケール η の比 $\sqrt{G}\eta$ という新しいパラメータが現れ、 $\sqrt{G}\eta \rightarrow 0$ の極限では、Q-ball の方程式に帰着する。従って、十分小さなエネルギースケール η の場合、Q-ball 解とほぼ同じようなボソン星解が現れることが期待される。しかし、 $\sqrt{G}\eta$ がわずかでも非零の値を持つ場合、重力崩壊から免れるために、必ず質量の上限値が現れる。

応募者はまず、上述のダストボールを基にしたボソン星解について解析を行った。その結果、あるクリティカルな $\sqrt{G}\eta$ の値を境に、場の振る舞いやボソン星における物理的な量が大きく変化することを明らかにした。最終的に、ダストボールを基にしたボソン星に対して以下のような結論を得た。

- 銀河中心ブラックホールと同程度の質量を獲得し得る。
- 光子球は存在しないが、ISCO は存在し得る。

相対論や宇宙物理の枠組みで、ブラックホール代替天体の一つとして、「グラバスター (GRAvitational VAcuum STAR)」と呼ばれる仮想天体が提案されている。一般にグラバスター解は、Israel の接続条件を用いて、内部の時空構造と外部の時空構造を接続することで、人為的に構築される。

応募者達が”ポテンシャルボール”と読んでいたタイプの Q-ball 解は、ソリトン内部が真空のエネルギーで満ちている、という特徴を有している。このポテンシャルボールを基にしたボソン星を考えた場合、内部が真空のエネルギーで満ちたボソン星を構築することが出来る。これは上述のグラバスターと同様の性質を有していることを明らかにした。また、この”ボソン星としてのグラバスター”は光子球を持つほど高密度になることが出来ることを明らかにした。