

Q-ballが宇宙論的相転移に与える影響

自然科学部門 上杉智子

1. はじめに

複数の極小値を持つようなポテンシャル中の複素スカラー場を考えると、このスカラー場の内部空間の対称性に起因する保存量（“保存電荷”と呼ばれる。通常電荷もこのような保存量の一つ。）によって安定化している、球形の空間的配位が定常解として存在する場合がある。この解はソリトン（有限の大きさを持ち、粒子のようにふるまう波）の一種であるが、通常ソリトン解が位相幾何学的な保存量によって安定化しているのと比較し、位相幾何学的ではないソリトン解という意味で、ノントポロジカル・ソリトンと呼ばれている。ノントポロジカル・ソリトンは、通常 Q と表される保存量（保存電荷）によって安定化していることから Q-ball とも呼ばれる。Q-ball は宇宙初期に起こったと考えられている相転移（宇宙論的相転移）中に生じ得ることが分かっており、現在の宇宙の物質の起源や暗黒物質（現在の宇宙の星間物質のうち、光を発していない物質のこと）の候補となる可能性や、宇宙論的相転移の描像に影響を与える可能性を持つ。宇宙論的相転移の描像自体も現在の宇宙の物質の起源等に深く関わりを持つため、これらの宇宙論的な問題の解明には、Q-ballの生成と安定性、相転移への影響を明らかにする必要がある。

2. Q-ball解

内部対称性として、大局的な（時空の場所に依らない） $U(1)$ 対称性を持つ複素スカラー場 ϕ を考える。このスカラー場のポテンシャル $V(\phi)$ が複数の極小値を持つ場合に、球対称の空間的配位を持つ定常解が存在し得ることが分かっている^{1), 2)}。

大局的な $U(1)$ 対称性によるスカラー場の保存量（今後、この保存量のことを“電荷”と呼ぶ。）を Q とし、スカラー場の全エネルギーを E とおく。このとき、 $\phi = 0$ ではないスカラー場の古典解を求めよう。電荷 Q ($Q > 0$) を持った状態で、この系の全エネルギー E を最小にするような解を求めることを考える。

電荷 Q ($Q > 0$) を持つという条件のもとで、全エネルギー E が極小となるような解の形を求めるためには、ラグランジュの未定乗数法を用いれば良い。ラグランジュの未定乗数を ω として、エネルギーを最小にするような場の配位を求めると、 ω が条件

$$\omega_0^2 < \omega^2 < \omega_+^2, \quad \omega_0^2 = \min\left(\frac{2V(\phi)}{\phi^2}\right), \quad \omega_+^2 = V''(0) \quad (1)$$

を満たす場合には、次のような球対称解が存在する。

$$\phi = \varphi(r)e^{i\omega t} \quad (2)$$

ここで、 ω の値は Q の値に依存する。この解をQ-ball解と呼ぶ。

このような解は、局所的な（時空に依存した）連続対称性を持つ複素スカラー場でも同様に存在することが分かっている³⁾。生成された Q-ball が安定に存在するには、ポテンシャルへの条件の他、一つの Q-ball の全エネルギー E が、Q-ball が崩壊して粒子の集まりになった状態のエネルギーの総和よりも小さいことや、同じくQ-ballの全エネルギー E が、より小さいQ-ball が集まった状態のエネル

ギーの総和よりも小さいこと、解の摂動への安定性などの条件が必要となる。

3. Q-ballの宇宙論的相転移への影響

Q-ballが一次相転移に与える影響について、相転移の臨界温度より宇宙が高い温度の時期についての評価は J. Ellis 等により成されており、この時期ではQ-ball は相転移の進行にはあまり影響しないことが示されている⁴⁾。

一方で、宇宙が臨界温度および臨界温度より低温の時期については、臨界温度より高温の場合とは異なり、次のようになる^{5),6)}。

宇宙が時間と共に冷え、相転移の臨界温度： T_c 以下になった時点を考える。ただし、この時点で核生成の温度よりは高い温度であるとする。すると、臨界温度以下では、ある電荷の値： Q_c を境として、Q-ball の電荷 Q が $Q < Q_c$ の場合は安定して存在できるサイズがあるが、 $Q > Q_c$ の場合はQ-ballは不安定であり、一旦生成されたQ-ball は膨張するという、電荷の臨界値が存在する。このため、臨界温度以下では、Q-ball によって偽の真空が不安定になり、Q-ballが相転移を進行させる場合があり得る。

4. 今後の研究

Q-ballは、宇宙の暗黒物質や物質の起源の候補であるため、その形成や安定性についての詳細な評価も重要となる。最近では、任意の空間次元での Q-ball の安定性の研究も成されている⁷⁾。

また、Q-ball の生成と発展の描像は、ある種の金属等におけるボーズ・アインシュタイン凝縮の描像と全く同じ物理を示していると考えられている。ボーズ・アインシュタイン凝縮は物性物理学において実験が進んでおり、宇宙での Q-ball と同等とみなせる条件ではないが、ボーズ・アインシュタイン凝縮により生じたソリトン同士の衝突などのダイナミクスや、それよりさらに宇宙での状況に近い実験での Q-ball の形成などが観察されている^{8),9),10)}。これらの実験がさらに進むと、初期宇宙での Q-ball と同等の状況の実験が実現されて、Q-ballの形成や安定性、ダイナミクスの解明が進むことが期待できる。今後も、これらの実験に注目しつつ、Q-ballの宇宙論的適用について調べていく。

参考文献

- 1) S. Coleman, Nucl. Phys. B262, 263(1985).
- 2) A. Kusenko, Phys. Lett. B404, 285(1997).
- 3) K.. M. Lee, J. A. Stein-Schabes, R. Watkins and L. M. Widrow, Phys. Rev. D39, 1665(1989).
- 4) J. Ellis, K. Enqvist, D. V. Nanopoulos and K. A. Olive, Phys. Lett. B225, 313(1989).
- 5) A. Kusenko, Phys. Lett. B406, 26(1997).
- 6) T. Shiromizu, T. Uesugi and M. Aoki, Phys. Rev. D59, 125010(1999).
- 7) M. I. Tsumagari, E. J. Copeland and P. M. Saffin, Phys. Rev. D78, 065021(2008).
- 8) K. Enqvist and M. Laine, JCAP 0308, 003(2003).
- 9) K. E. Strecker, G. B. Partridge, A. G. Truscott and R. G. Hulet, Nature 417, 150(2002)
- 10) Y. M. Bunkov, G. E. Volovik, Phys. Rev. Lett.98, 265302(2007).