

# Two Dimensional Gluonic States in Quark Matter

岩崎愛一<sup>1</sup>

二松学舎大学 国際政治経済学部

クォーク物質中ではカラー磁場が自発発生する相が存在する。すなわち、カラー強磁性相である。そこではカラー磁場に巻きついたグルーオンが凝縮して２次元量子井戸に似た状態を作る。そこに無限に縮退したグルーオン状態が、自己斥力の効果で量子ホール状態を作る。以上のことを光円錐量子化を用いて議論した。

中性子星内部の平均密度は、その質量が太陽質量の 1.4 倍、半径 10 km の時すでに、核密度の 2 から 3 倍に達する。平均密度がそれほど高密度であることから、中性子星の中心付近はかなりの高密度であると推察される。そこは核物質ではなくクォーク物質に支配される世界であろう。

では、そのクォーク物質はどのような性質をもつ状態なのであろうか？ 最近明らかになったことのひとつは、ストレンジネスクォークも質量ゼロと見なせるほど超高密度のクォーク物質は、カラー超伝導状態となることである。すなわち、u, d, s それぞれのクォークがクーパー対を作り凝縮するのである。その世界にクォークは存在するが、電子は存在しない。つまり、クォークだけで電気的中性を保っているのである。それぞれの電荷は  $u(2/3)$ ,  $d(-1/3)$ ,  $s(-1/3)$  であり、それぞれが同数存在すれば、電気的に中性である。この電気的に中性なクォーク物質は高密度極限で存在する。さて、密度がより小さく、現実的な状況ではどのような状態になっているであろうか？。クォーク物質の密度が下がり、ストレンジクォークの質量が無視できなくなると、電気的中性はクォークだけでは保たれなくなり電子が存在するようになる。その電子の密度は、クォーク物質の密度が下がるにつれ、逆に大きくなる。つまり、電子のフェルミ運動量が大きくなるのである。ところが、さらに密度が下がると、カラー超伝導状態が不安定になることが最近分かってきた。つまり、電子のフェルミ運動量が、カラー超伝導を特徴付ける秩序パラメーターと同程度の大きさにまでなると、超伝導状態は不安定になるのである [1]。その兆候は、安定な超伝導を特徴付ける準粒子ギャップがゼロとなることが指摘された時からすでにあった。その後様々な不安定性が指摘された。まず最初に指摘されたのが、マイスナー効果が有効でなくなり外部磁場の侵入がはじまることである。続いて、凝縮対の空間的一様性が保たれなくなり、非一様となることが示された。さらに興味あることが指摘された。それは、グルーオン場の凝縮がはじまる事である。つまり、カラーゲージポテンシャルがゼロでない値をもつ。しかも一様なグルーオン場でなく、凝縮対と同様に空間的に非一様な場が生まれるという。この非一様なグルーオン場の発生は、すなわちカラー磁場の発生を意味している。磁場はゲージポテンシャルの空間微分で与えられる。このようにして、クォーク密度が小さくなり電子密度が大きくなってくると、カラー超伝導状態は不安定となる。マイスナー効果が消え外部磁場が進入するのみならず、自発的にカラー磁場の発生が起こるのである。このところは、カラー超伝導状態が壊れて、カラー磁場が自発発生したカラー強磁性状態 [2, 3] に相転移することを意味するのではないだろうか？ すくなくとも、カラー超伝導の議論で今まで考慮されていないグルーオンの量子効果が重要になってきていることは明らかである。

われわれは数年前からクォーク物質中でのグルーオンの量子効果を議論してきた [3]。その結果、高密度クォーク物質にはカラー強磁性状態が存在し、それが中性子星内部あれば、マグネッターに見られる超強磁場の発生源になりうることを明らかにした。高密度クォーク物質中ではクォーク、グルーオンがもつ典型的な運動量が、QCD の特徴的なスケールに比べ十分大きく、ループ近似等が有効になる。そこでは、グルーオンのループ効果でカラー磁場が自発的に発生する。すなわちカラー強磁性状

---

<sup>1</sup>e-mail address: a.iwazaki@hotmail.com

態となる。そこで、クォークのエネルギーをも考慮して、エネルギー的に安定な状態は高密度極限ではカラー超伝導、より密度が低いところでカラー強磁性となることを指摘した。この議論からクォーク物質の密度を下げるとそのカラー超伝導状態は、カラー強磁性に移行するため何らかの不安定性を示すことが期待される。上に述べた最近の研究は、まさにその不安定性を示しているのではないだろうか。

さて、自発発生したカラー磁場中でグルーオンは不安定、すなわちそのエネルギーが虚数となるゆえ、単純にカラー磁場が存在するだけの状態ではない。その磁場に巻きつくグルーオンが凝縮を起こすのである。どのような凝縮を起こすのかは詳細な議論が必要である。われわれは、ゲージ理論を光円錐量子化法を用いて量子化し、その問題を解析した [4]。

その光円錐量子化では、磁場中のグルーオンのエネルギーは常に実数であり、虚数であることから来る問題を回避でき、解析が容易となる。その結果、虚数エネルギーを持つグルーオンに相当するものは、負のエネルギーを持ち、それが多数励起される。その多重発生で、ナイーブなゼロエネルギー状態、すなわち Fock 真空 (グルーオンがない状態) より、エネルギー的に安定な状態が作られるのである。(光円錐量子化で、いわゆるゼロモードを手で落として求まるハミルトニアンを解析すると、そのハミルトニアンは扱いが単純にはなるが、Fock 真空が基底状態であるというこの量子化方のメリットはなくなってしまふ。それゆえ、負のエネルギーをもつグルーオンが多数励起し新しい基底状態が生まれる。しかし、ゼロモードを手で落とすという近似は、ハミルトニアンを単純にするだけでなく、系の重要な性質を保ったままであることは、単純なモデルで確認されている。) この不安定グルーオン (負のエネルギーを持つグルーオン) の凝縮の結果実現する状態は、興味深いことに、半導体中に作られる 2 次元量子井戸と同様な 2 次元状態である。すなわち、そこでの励起状態は磁場に平行なものと、それに垂直なもの (2 次元励起状態) とに分かれ、平行な励起状態は有限なギャップがあり、垂直な状態はギャップレスである。平行な励起は、グルーオンの凝縮状態を磁場方向に変化させ、垂直な励起は磁場に垂直方向に変化をもたらす。その垂直励起がギャップレスとして存在することは、低エネルギー状態を考える限り、その励起のみが問題となる。ちょうど 2 次元量子井戸と同じである。低温では量子井戸内の励起が問題となる。

具体的には、SU(2) ゲージ理論を考える。カラー磁場 ( $B$ ) に対して、カラー空間で磁場に垂直な成分のグルーオンがランダウ準位を作る。そのうち最低ランダウ準位にあるグルーオンが負のエネルギーを持つ。その状態は磁場方向の縦運動量  $k$  と磁場の回りの角運動量で特徴付けられる。角運動量に対しては、無限に縮退している。それが負のエネルギー ( $E = -gB/k$ 、ここで  $g$  はゲージ相互作用定数) を持つため多数励起するが、グルーオンの 4 次の自己相互作用 (斥力) で適当な密度で励起はストップし凝縮状態を作ることになる。またその時、カラークーロン相互作用の結果 (この相互作用は、光円錐ゲージを選択した結果現れる) ゼロでない縦運動量  $p_0$  を持つ状態のみが凝縮する。つまり、基底状態は縦運動量  $p_0$  をもつ最低ランダウ状態のみが凝縮して作られるのである。一方、無数に縮退した縦運動量  $p_0$  を持つ最低ランダウ状態はグルーオンの自己相互作用、あるいはカラークーロン相互作用でもその縮退は解けないで、縮退が残る。これがギャップレス状態をもたらす。それはボソンであるゆえ、結果として基底状態は無数に縮退していることになる。他方、磁場に平行な励起状態はカラークーロン相互作用の結果、有限なギャップが生まれる。(すなわち、磁場方向の縦運動量  $k$  が、基底状態を特徴付ける運動量  $p_0$  でない値を持つ励起状態。) このギャップが、カラークーロン相互作用で生まれることは重要な点である。ゲージ理論に特徴的な相互作用であり、4 次の自己相互作用では (これはゲージ理論に特徴的な相互作用でない) そのギャップは生まれない。

磁場方向に非一様な励起状態がギャップを持つことは、あたかも、グルーオンが量子井戸に閉じこめられているようなものである。ちなみに、半導体中に作られる量子井戸は縦、横方向に広がった 2 次元構造をしており、そこに電子が入る。その 2 次元面に垂直方向の電子状態はギャップが存在し、励起させるためには、ギャップエネルギー以上のエネルギーが必要となる。他方、面内の電子状態はギャップレスであり、低エネルギーではその面内状態のみが問題となる。これに似た構造が、まさしく、クォーク物質中のグルーオンに対して現れるのであり、グルーオンは 2 次元量子井戸を自ら作り、

低エネルギー状態としてそこに閉じこめられるのである。基底状態は無数に縮退している。この無数に縮退した状態に、4 次の自己相互作用（斥力）が作用すると、自然に量子ホール状態 [5] が生まれ、縮退が解けギャップができる。このグルーオンの量子ホール状態が、クォーク物質のカラー強磁性状態を支えているのである。

結局、クォーク物質中ではカラー磁場が自発発生し、それに巻きつくグルーオンが2次元量子ホール状態を作ることによってグルーオンの基底状態（量子ホール状態）は、すべての励起状態がギャップを持ち安定なものとなる。

## 参考文献

- [1] M. Huang and I.A. Shovkovy, Phys. Rev. D70 (2004) 051501.  
D.K. Hong, hep-ph/0506097.  
E.V. Gorber, M. Hashimoto and V.A. Miransky, hep-ph/0509334.  
I. Giannakis, D. Hou, M. Huang and H. Ren, hep-ph/0606178.
- [2] G.K. Savvidy, Phys. Lett. B 71 (1977) 133.  
N.K. Nielsen and P. Olesen, Nucl. Phys. B 144 (1978) 376.
- [3] A. Iwazaki and O. Morimatsu, Phys. Lett. B 571 (2003) 61.  
A. Iwazaki, O. Morimatsu, T. Nishikawa and M. Ohtani, Phys. Lett. B 579 (2004) 347.  
A. Iwazaki, O. Morimatsu, T. Nishikawa and M. Ohtani, Phys. Rev. D 71 (2005) 034014.  
A. Iwazaki, Phys. Rev. D72 (2005) 114003.
- [4] A. Iwazaki, Phys.Rev.D75 (2007) 034020.  
A. Iwazaki, Phys.Rev.D75 (2007) 105009.  
A. Iwazaki, hep-ph/0705.085.
- [5] The Quantum Hall Effect, 2nd Ed. edited by R.E. Prange and S.M. Girvan ( Springer-Verlag, New York, 1990 ).