超強磁場中での QED の変更と宇宙物理への影響

郡　和範
京都大学基礎物理学研究所
E-mail: kohri@yukawa.kyoto-u.ac.jp

Abstract

最近、特異な天体として注目を集めている soft gamma-ray repeater や anomalous X-ray pulsar の候補として、magnetar と呼ばれる 10^{15} gauss を超えるような強磁場を持つ天体の可能性が理論的に指摘されている。そのような強磁場中ではＱＥＤの高次の摂動が無視できなくなり、photon の性質等は大きな変更を迫られることになる。今回は特に vacuum polarization に与える変更を紹介し、その宇宙物理への影響を報告する。

今日、量子電気力学、つまり Quantum Electrodynamics (QED) は電磁気学を記述する場の理論として広く信じられ受け入れられている。その摂動論的な取り扱いは高次の効果まで数々の実験と矛盾なく一致し、場の理論に置けるゲージ原理の正当性を裏付ける礎であり、力の統一理論を模索する手がかりとなっいる。[1]

QED の取り扱いで、外場である磁場 B は coupling constant e で electron と結合している。磁場 B が弱いような通常の環境下においては、e に対する摂動の leading order を考慮する限り、外場の影響は完全に無視することができる。しかし、もし磁場 B が臨界磁場 $B_c = m_e^2/e (\sim 4 \times 10^{13}$ gauss) 程度、もしくはそれ以上あるような環境下においては通常の摂動的な取り扱いが不可能となる。その場合、物理量を計算する手法を変更する必要が出てくる。

最近、soft gamma-ray repeater や anomalous X-ray pulsar と呼ばれる特異天体の存在が報告されてきている。それらの pulsation の周期 P を横軸に、周期の減速する時間変化 $\dot{P}$ を縦軸に取った、いわゆる $P - \dot{P}$ diagram でのプロットを見てみると、それらが通常の pulsar とは大きく外れた天体であることがよくわかる。もし、周期の減速を天体固有に持った磁場による dipole radiation に起因する energy loss と考えるならば、それらは 10^{15} gauss を超えるような強磁場を持つことになる。 [2]

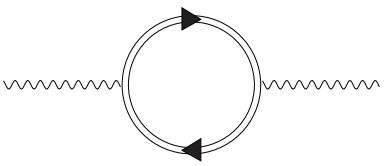

Figure 1: 強磁場中での photon の vacuum polarization。2 重線は磁場からの vertex のすべての寄与を含んだ electron propagator を表わす。

上記のような B_c を超えるような強磁場を持つコンパクト天体での物理量を計算するために、我々は Schwinger's proper-time method [3] を用いる。それは磁場のすべての効果を足し合わせた electron の propagator の計算方法を与えるものである。図 1 に示すように、強磁場中では photon の繰り込まれた真空偏極 (vacuum polarization) が non-zero であり、photon の分散関係が変更される。それにともない、photon の屈折率 $\mu^2 = |\boldsymbol{k}|^2/\omega^2$ が 1 からずれる。ここで ω は photon の energy であり、$\boldsymbol{k}$ は photon の momentum である。

図 2 に規格化された磁場 B/B_c の関数としての屈折率のプロットを示す。μ_1^2 は磁場の方向と photon の伝搬する方向とが作る面に垂直な偏極 vector の固有状態に対応する屈折率で、μ_2^2 はそれに直行する成分である。この図より、μ_2^2 のほうは極限値 $(1/\cos^2\theta = 2)$ に強磁場極限で近づき、1 から大きくずれることがわかる。[4]

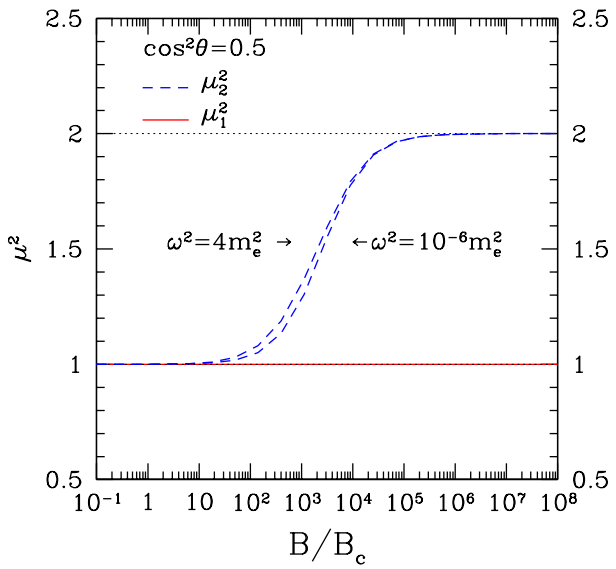

Figure 2: 規格化された磁場 B/B_c の関数としての photon の屈折率のプロット。実線は屈折率 μ_1^2 を表わす。破線は屈折率 μ_2^2 を表わす。左側の (右側の) 破線は photon の振動数が $\omega^2 = 4m_e^2$ $(10^{-6}m_e^2)$ の場合である。μ_2^2 は極限値 $(1/\cos^2\theta = 2)$ に強磁場極限で近づくことがわかる。ここでは磁場の方向と photon の伝搬する方向との間の角が $\cos^2\theta = 0.5$ の場合を示した。

References

[1] C. Itzykson and J-B Zuber, *Quantum Field Theory*, McGRAW-HILL, 1980.

[2] M.G. Baring and A.K. Harding, astro-ph/0010400.

[3] J. Schwinger, Phys. Rev **82**, 664 (1951).

[4] K. Kohri and S. Yamada, in preparation.