コメント

強磁場天体で可能な新しい物理

板倉数記
KEK理論センター

8月31日@京大基研
「ハドロン物質の諸相と状態方程式」

「強磁場」というが、、、

どれほど強いのか？

$$B \sim 10^{14}\text{-}10^{15}\ \text{Gauss}$$

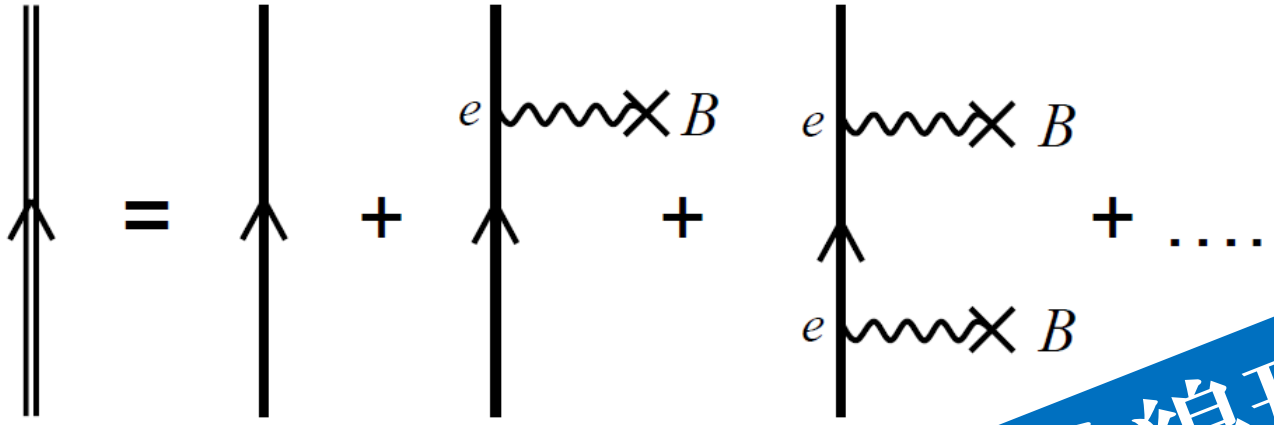
何に比べて、強いのか？

$$B_c = 4.4 \times 10^{13}\ \text{Gauss}$$

電子の臨界磁場

地球上での最強の人工静磁場は 4.5×10^5 Gauss

強いと何が凄いのか？



$$1 + O\left(\frac{eB}{m_e^2}\right) + O\left(\left(\frac{eB}{m_e^2}\right)^2\right)$$

非線形QED

$$eB/m_e^2 = B/B_c \sim 10\text{-}100$$

磁場について無限次まで効く！

本質的に新しい現象が可能

強い場がもたらす新しい物理

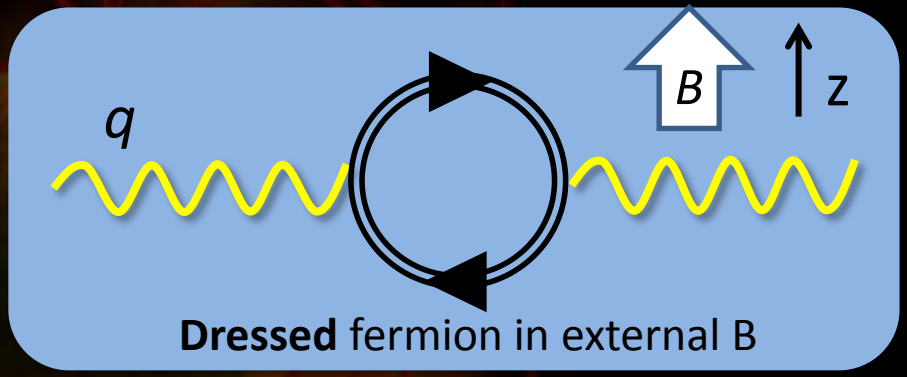
- 光子の複屈折、崩壊
- 光子の分裂（と融合）
- Schwinger機構（e^+e^-生成）
- ・・・ ほかにもたくさん（例；axion, …）

これらが起こる！（どれも未検証）

→ 本当は「新しい」ものではないが、
現代的な視点から捉え直すことが必要

光子の複屈折、崩壊

- 磁場の存在のため　光の屈折率が変化
  磁場と平行、垂直成分が
  異なる応答　→「複屈折」
  e+e- pair への崩壊も可能



- 強磁場天体では
  磁場によるレンズ効果、光子の偏極

- 理論計算

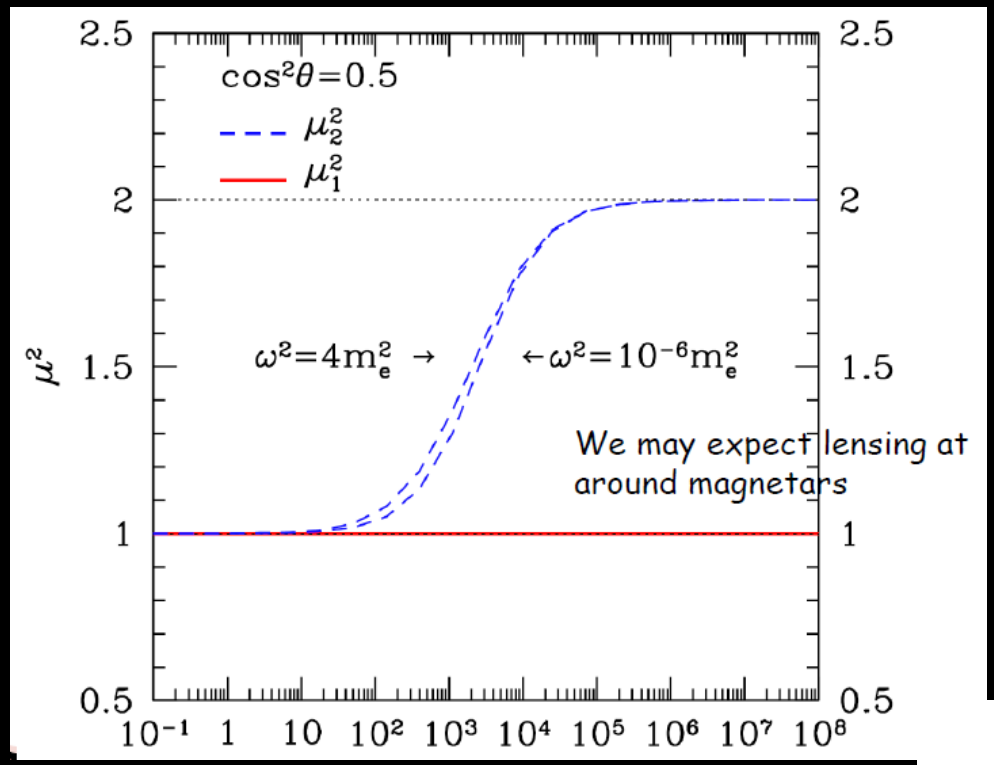
Kohri, Yamada PRD (2002)　complete solution below threshold

Hattori, KI (2012)　(I) analytic results with all order Landau levels

arXiv: 1209xxx　来週

(II) strong field limit and lowest Landau level

arXiv: 1209xxx　9月中



B/Bc=*B*r

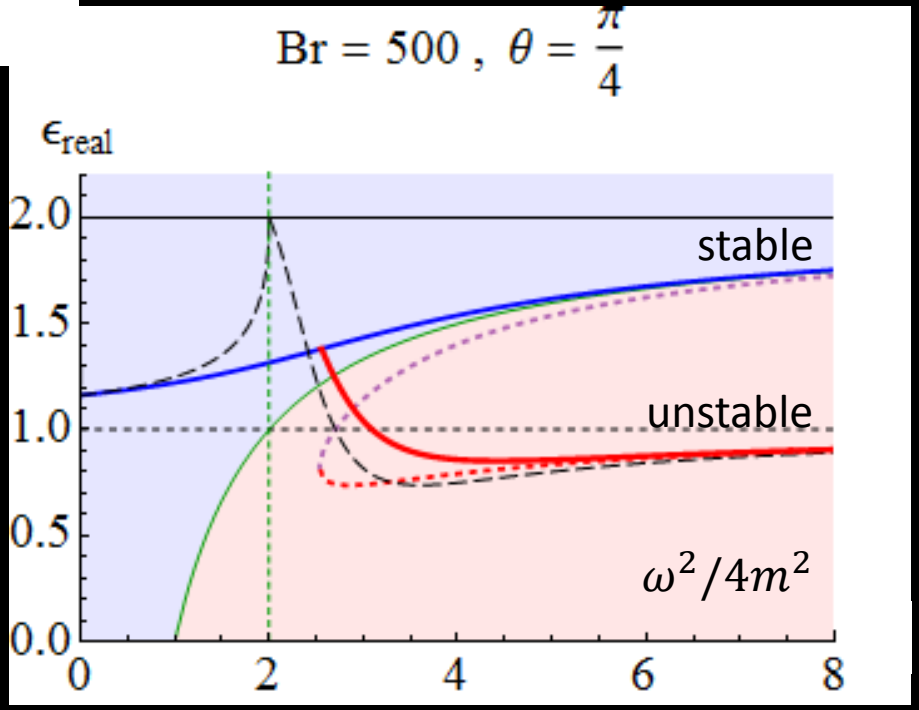
←Below threshold

(Kohri-Yamada 2002)

$$\mu^2 = \frac{|\vec{\mathbf{k}}|^2}{\omega^2} = \varepsilon$$

Beyond threshold→

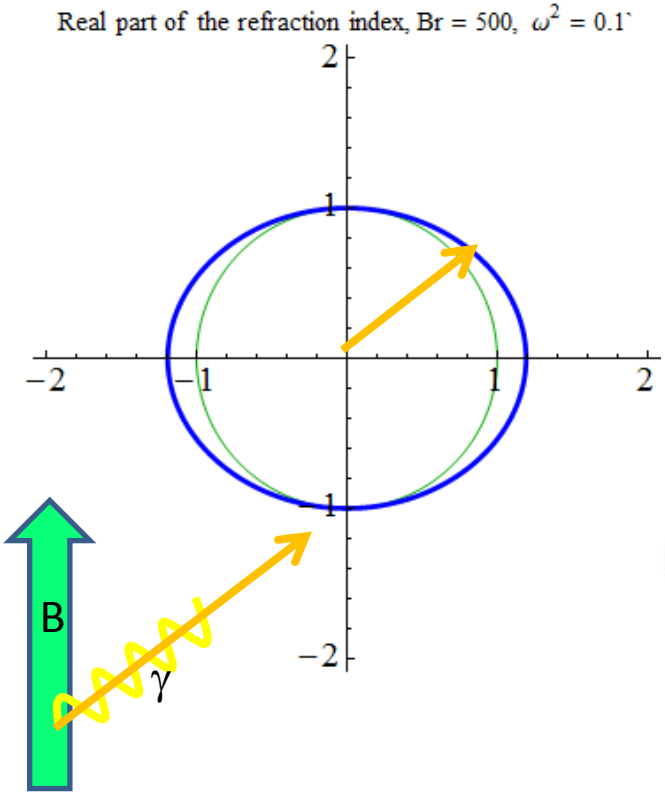
(Hattori-Itakura 2012)

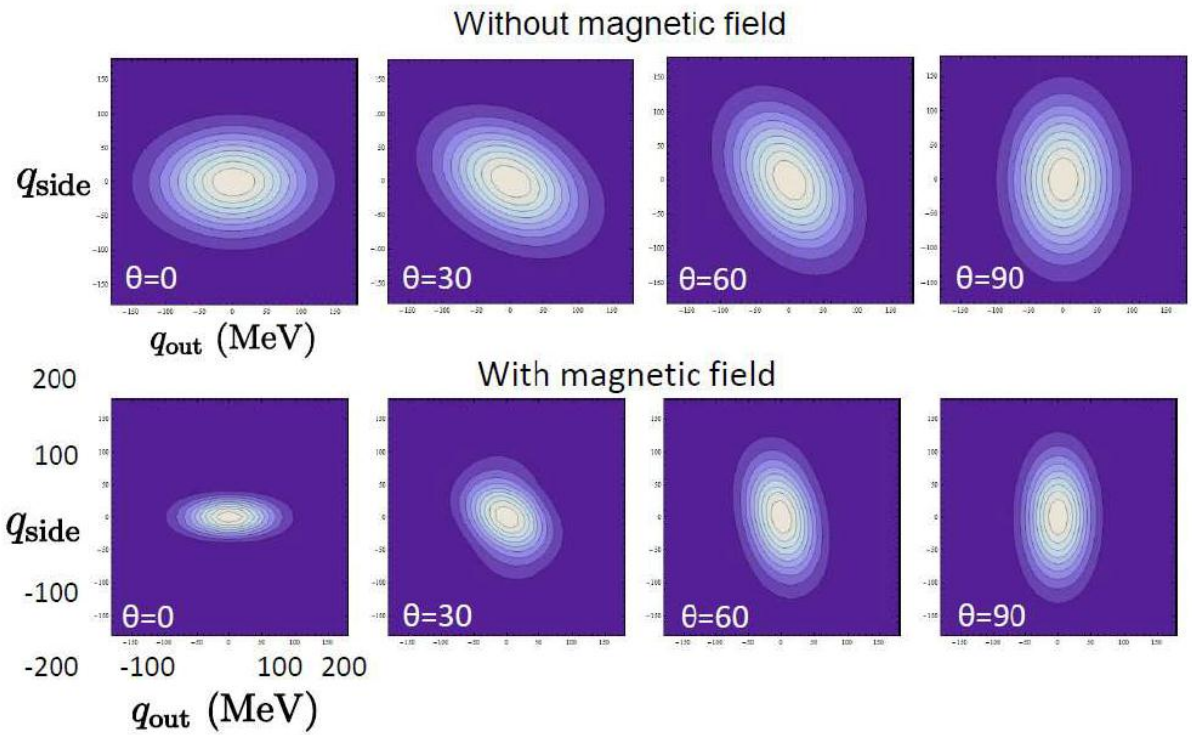


磁場によるレンズ効果

重イオン衝突の場合

Hattori & KI, arXiv:1206.3022





運動量空間で像が(異方的に)収縮 → 実空間では歪んで拡大

光子の分裂と融合

- 高エネルギー光子が
  分裂により低エネルギー化
  逆プロセスも可能　（グルオン飽和に似てる！）

- マグネターの特異なスペクトルを説明できるか？

- 理論計算
  低エネルギーでしか知られていない　(Adler, 1971)
  高エネルギー(500keV近傍)でのヴァーテックスの評価が必要
  (Adler-Schubert, 1996 は式を書いただけで評価せず！！)

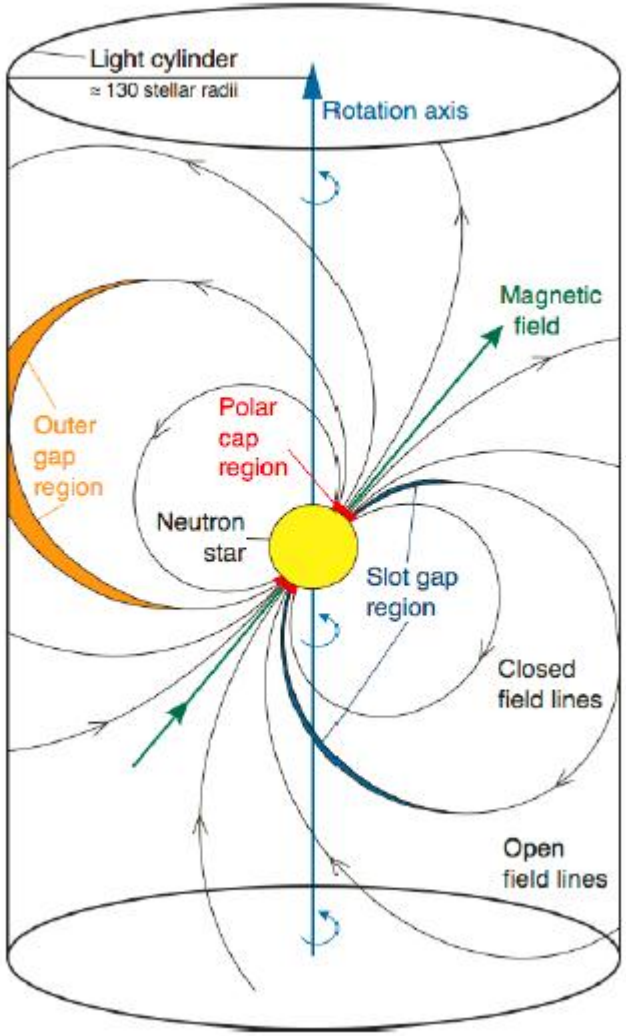
Schwinger機構

- パルサー;
  回転軸と磁軸のずれ

  強磁場 → 強電場を誘起
  → 電子・陽電子対生成
  → その雪崩的生成
  → 電子(陽電子)と光子の
  ジェット形成 ?

<u>Schwinger機構の閾値</u>
単純な指数関数の肩で与えられる
臨界電場より2桁小さくても可能か

Aliu, et al (MAGIC collab.) Science 2008



最後に

- マグネターのような「強磁場天体」では、強い場の物理に関係する興味深い現象が起こる。
- 最近、理解が急速に進んでおり、信頼のできる定量的計算ができる段階に来ている！！
- 全て高強度レーザー、重イオン衝突などでも出現するという意味で、QEDだが、普遍性あり。QCDでは、「当たり前」の現象ばかり。

「強い場の物理」から見た高エネルギー重イオン衝突

板倉 数記
kazunori.itakura@kek.jp
高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 理論センター

RHIC や LHC における高エネルギー重イオン衝突では、現在の宇宙のなかで最強の二つの場が生ずる。まず、大きな電荷をもつ原子核が高速で衝突することで、ごく短い時間だが非常に強い電磁場が生成する。一方、衝突直前の原子核は高密度の飽和グルオン状態として記述されるが、衝突によってその高密度グルオンが解放され、非常に強いカラー電磁場が生成する。本稿では、これらの「強い場」がもたらす新しい物理を紹介し、その新しい視点から重イオン衝突における重要な未解決問題にどのように切り込んでいけるのかを解説する。

1 古くて新しい「強い場の物理」

最近、「高強度場の物理」や「強い場の物理」という言葉を聞く機会が多いと思うが、その基礎を成す概念・手法自体は非常に古い。まず簡単に 3 つの例でそれを見ておこう。そもそも、強い場の物理における最重要文献である、Euler と Heisenberg による強い電磁場の非線形な有効理論の導出は 1936 年に書かれており [1]、その結果を場の理論的に再導出した有名な Schwinger の論文も 1951 年に書かれたものである [2]。また、非常に大きな電荷をもつ原子核のまわりでは、強電場が存在することで真空が不安定化し、電子・陽電子対が生成するという可能性も古くから議論されている（いわゆる high Z atom）。驚くべきは、1916 年の時点で既に、Sommerfeld は Z が $1/\alpha - 137$ を超えたときに電子のエネルギーが複素化（従って何らかの不安定性を示唆）する結果を得ていた。[1] 三番目の例は、電子がミュー粒子で置き換わった原子である muonic atom。ミュー粒子は、質量が電子の 200 倍もあるので、電子よりも原子核に 1/200 も近い距離に居り、従ってより強い Coulomb 力を感じることになる。原子核との多重 Coulomb 交換の効果などが古くから議論されている。[2] これらの強い電磁場の絡む物理は、しばしば「非線形 QED」という言葉で表される。後述するように、弱結合の QED であっても、場が強いことを反映して非線形・非摂動的な現象を示す領域という含意である。

[1] この辺りの事は、K.T.McDonald の小文に簡潔に記されている [3]。なお、そこにもあるように、低エネルギーの重イオン衝突で臨界 Z を超える原子核を一時的に作り、電子・陽電子対の生成を見るという実験は、一度は観測されたと報告されたが、現在では否定されている。ちなみに、平成 17 年出版の丸善『物理学大辞典 第 2 版』（菅及彦）は、McGraw-Hill の "Encyclopedia of Physics, 2nd edition" (1993) に典拠するが、「超臨界場」の項目で high Z atom における電子・陽電子対の生成が観測されたと述べている。しかし、これは 1999 年の否定的実験結果 [4] の前に書かれたものである事に注意。

[2] 高エネルギー重イオン衝突の大家である McLerran と Gyulassy は、どちらも学生時代にこの問題に取り組み、互いを知るに至ったそうだ。この辺りの事は、W.Greiner の 70 歳を祝う会議での McLerran の proceedings に書かれている [5]。

次号の『原子核研究』に掲載

- 「強い場の物理」の概観を含む

  光子の複屈折、崩壊、分裂
  Schwinger機構

- 「強い場の物理」の学際性

  宇宙物理、原子核・ハドロン物理、
  素粒子物理、レーザー物理、
  物性物理、原子物理

原子核研究を定期的にもらっていない方で、ご希望の方には、別刷りをお譲りします。
直接、又はメイルで
kazunori.itakura@kek.jp