

高強度場の物理

広島大学大学院 先端物質科学研究科

高橋 徹

tohru-takahashi@hiroshima-u.ac.jp

2010年2月23日

1 はじめに

2010年11月24日から26日まで、KEKにおいて、International Conference on Physics in Intense Fields (PIF2010)が開催された。この会議の目的は、「高強度場の物理」についてその物理の可能性、世界の状況と展望について議論し、将来の展開の可能性を考える契機とすることであった。本稿ではこの会議の様子を紹介がてら、少し紙面をいただいて、

- 高強度場の物理とはどんなものか
- この分野の我が国および世界の状況
- 高強度場(特に高強度レーザー)でできること

について解説を試みたい。

2 高強度場の物理

2.1 高強度場とは

通常の粒子加速器による実験では、粒子-粒子間の点相互作用を研究対象としていることが多い。実際のデータ解析は単純ではないが、研究の対象は点相互作用であって、それ以外の現象はバックグラウンドと考えるのが普通だろう。筆者もレーザー-電子散乱による X 線やガンマ線生成の研究に携わっているが、レーザーを使うのは光子密度を上げることが目的であって、レーザーの作る強い電磁場やそのコヒーレンスはその目的(レーザー強度、すなわち光子密度の向上)のために利用している。

しかし、場の強度が高くなってくると、そこにおける粒子の振る舞いは単純な点相互作用からずれてくる。本稿で議論する高強度場の物理とは、このような高強度場が作り出す現象を積極的にとらえ、これまで研究されたことがない高強度場中における素粒子の振る舞いやそれを通じた新たな素粒子物理学の可能性を探るものである。

単に高強度場という場合、原理的にはその種類は問わない。しかし現実に研究対象と考えられるのは、レーザーによる高強度電磁場や、自然界で観測される高強度場に起因した現象、重イオン衝突中でおこる高強度グルーオン場だろう。その中でもレーザーによる高強度電磁場の利用はレーザー技術の発展にもなって急速に現実味をおびてきた。

図1はレーザー強度の発展の時間推移を表したものである。1960年のレーザーの発明以来、その強度は急速に増加している。特に1985年のChirped Pulse Amplification(CPA)という増幅方法の発明を契機に、ペタワット($PW = 10^{15} W$)レーザーはすでに現実となり、さらにはゼタワット($ZW = 10^{18} W$)も近い将来実現される見通しである[1]。

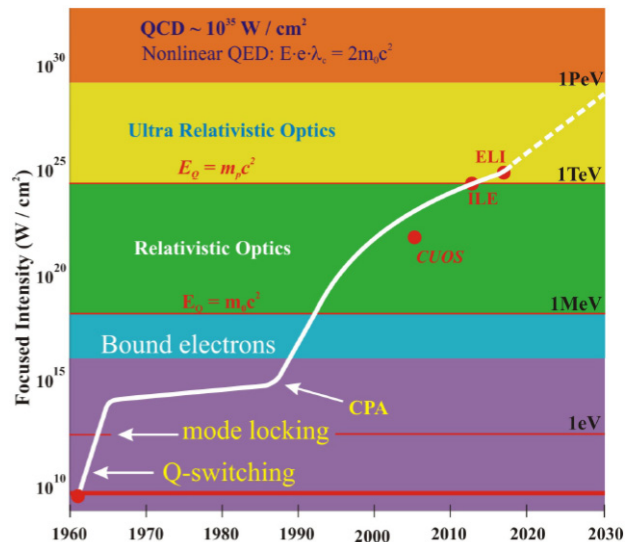


図1 レーザー強度の推移とその予想[1]

縦軸はレーザーのエネルギー密度、横軸はその稼働年。レーザー施設の規模を表す場合は、本文中のようにレーザーの尖頭出力を用いることが多い。図中 CUOS は300 TW を実現している。ILI は10 PW, ELI は100 PW 超を狙っている。

高強度電磁場中の粒子の振る舞いを考える場合、場の強度の指標として、規格化された電場強度：

$$a_0 \equiv \frac{eE_0\lambda}{2\pi mc^2} \sim 0.85 \times 10^{-9} \lambda \sqrt{I} [\text{W}/\text{cm}^2]$$

が使われる。ここで e, E_0, m, λ はそれぞれ、素電荷、電場強度、電子の静止質量、電磁場の波長、 I は電磁場の強度である。表式が示すように、 $a_0 \sim 1$ というのは、電子が電磁場中をその波長程度の距離を移動したときに、自分自身

¹ このレーザー強度は尖頭出力(パルスあたりのエネルギーをパルス幅で割ったもの)である。集光性能まで含めたエネルギー密度は W/cm^2 で表す。図1はこれを縦軸にとっている。

の質量に匹敵するエネルギーを得る電場強度である。したがって、電場強度がこれを超えるような状況では、電場中での電子の運動が相対論的になり、点相互作用では無視していた散乱過程における粒子の物理的な運動を考慮する必要が生じる。この $a_0 \sim 1$ という状況は、波長 $1\mu\text{m}$ 、パルスあたりのエネルギー 1J/pulse 、パルス長 1ps (すなわち 1TW) のレーザーを回折限界まで集光することに相当し、現在では机上の装置で実現可能である。また、 a_0 が 100 を超える装置も現実のものとなっている。

2.2 高強度場電磁場中の物理現象

高強度場中で発現する現象は多彩なものがある。ここでは PIF2010 で議論された中から、いくつかを取り上げて紹介したい。

高強度場の物理を考えるときに、まず思い浮かぶのは、光子と電子のコンプトン散乱だろう。電磁場の強度が低いときはよく知られたコンプトン散乱だが、前述の a_0 が 1 を超えると、場の影響が現れる。具体的には電磁場中の電子運動が相対論的になることによる相対論的な質量の増加： $\bar{m} = \sqrt{1+a_0^2}m$ 、とそれに起因するコンプトン散乱スペクトルの赤方変位や電子と多光子のコヒーレントな散乱による高調波の発生；

$$e^- + n\gamma_L \rightarrow e^- + \omega$$

である(図 2)。この現象は $a_0 \sim 1$ 近傍では SLAC の E144 実験、我が国でも KEK-首都大-BNL グループ、KEK-広島大-阪大グループなどによる研究がある[2-4]。また、E144 ではコンプトン散乱で発生した光子と多光子の反応による非線形対生成も観測されている。

$$\omega + n\gamma_L \rightarrow e^- + e^+$$

しかし $a_0 \gg 1$ のような場の強度の影響が顕著になるような状況で実験が行われた例はない。また、高強度場の源を平面波と取り扱える場合はよいが、実際のレーザー光のように強度分布を持つ場合、さらにレーザーのパルス長と波長が近づくような超短パルスレーザーの場合はさらにその取り扱いが複雑となる[5]。

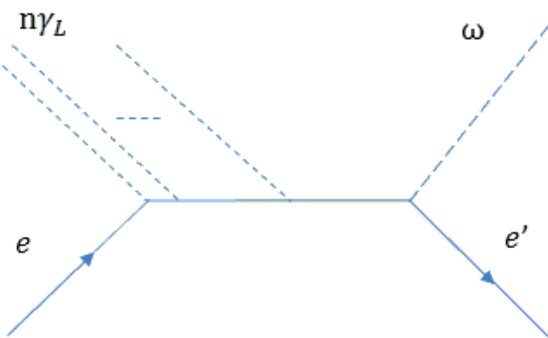


図 2 レーザー電子散乱における多光子吸収による高調波発生のダイアグラム

前述の対生成の究極の極限は、高強度電場の影響のみで真空が放電する場合である。これはシュレディンガー効果と呼ばれる。その電場強度(シュレディンガー場)を E_s 、電子のコンプトン波長を λ_c とすると、 $eE_s\lambda_c = mc^2$ から

$$E_s = m^2 c^3 / e\hbar \sim 1.3 \times 10^{18} \text{ V/m}$$

であり、これは $a_0 \sim 2.6 \times 10^6$ (波長 $1\mu\text{m}$ の場合)に相当する。現存の装置でこれを直接達成することは困難だろう。しかし、定常電場ではなく、振動電場によってシュレディンガー効果の閾値を下げる可能性が議論されている(図 3)[6]。それによると、高強度レーザーと、より速く振動する低強度レーザー(X線レーザー)を同時に照射すると、シュレディンガー効果の閾値をレーザー強度にして 3 桁下げることが可能とのことである。これが実現すればシュレディンガー効果は後述の ELI プロジェクトの視野に入ってくる。

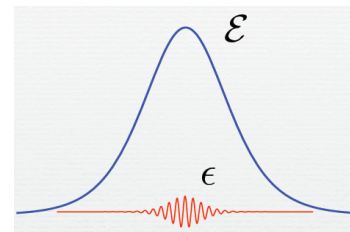


図 3 高強度電磁場 ϵ と振動する電場 ϵ の印可によるシュレディンガー効果閾値減少方法の概念図[6]

電場強度の観点からは話が前後するが、対生成に至らずとも、高強度電場によって真空を分極させることが原理的に可能であり、これは真空の屈折率のずれとその方向依存性、いわゆる複屈折として現れる(図 4)。真空の複屈折に対する QED の予測値は

$$\Delta n \equiv \sim 1.6 \times 10^{-34} I [\text{W/cm}^2]$$

と非常に小さい[7]。ここで Δn は電場に平行な方向と垂直な方向の屈折率の差である。しかし図 4 に示す過程にアキシオンのような軽い粒子の寄与があった場合、QED からのずれとして観測される。そのため、これまでも電磁石の強磁場などによる探索が盛んに行われてきた[8]。この効果は場の強度の 2 乗に比例し、高強度レーザーを用いた探索の可能性が議論されている[7]。

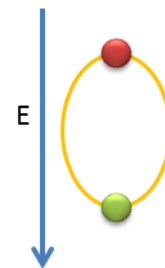


図 4 高強度電場による真空分極の概念図

真空中では粒子反粒子が $\Delta t \sim \hbar / mc^2$ 程度の時間仮想的に現れると考えられる。そこに外場があると、粒子の方向がそろうため真空に複屈折が現れる。またその時間内に質量を超えるエネルギーを外場から得ると実粒子として現れる。

ここまでの話は高強度場と粒子の相互作用という観点だったが、高強度場中で電子が受ける加速度を考えると別の視点が考えられる。よく知られているようにブラックホールはその質量に反比例する熱輻射(ホーキング輻射)を出し、その温度 T は $kT = \hbar c^3 / 8\pi GM$ と表すことができる。一方加速度 α を受けている電子にとって真空は温度 $kT = \hbar\alpha / 2\pi c$ の熱浴に見える。これはアンルー(Unruh)効果と呼ばれる。従って我々はその効果を、加速を受けている電子からの輻射(アンルー輻射)として観測できるはずである。ホーキング輻射と異なり、我々自身が熱浴を直接観測できないため、その影響の見積もりは複雑であり、アンルー輻射についての理論的取り扱いが決着がつかない。PIF2010 でもこれに関する議論があり、電子からはあたかも入射レーザーのダウンコンバージョンのような2光子が放出される可能性や[9]、電子からの輻射と熱浴からの輻射の振幅の干渉効果の計算の重要性など、興味深い議論があった[10]。

2.3 高強度電磁場の周辺

前述のように高強度場という場合、電磁場だけを指すものではない。たとえば、LHC における重イオン衝突では、高強度磁場やQCDカラー場が作られ、その強度は $10^{13} T$ に達する。これは $10^{-23} s$ という非常に短い時間に非常に複雑な多体相互作用で作り出される現象であるが、シュレディンガー場 $B_s = E_s / c \sim 4 \times 10^9 T$ を遙かに凌駕している。一方レーザーによる高強度電磁場はその強度は重イオン衝突には及ばないが、精度よく制御された状況下における基礎過程の解明には有効であり、重イオン衝突と高強度レーザー場の物理の協調による進展が期待できる[11]。同様のことは、自然界に存在する高強度場現象にもいえる。 $10^9 T$ を超える磁場をもったマグネターの存在が知られており、そこにおける高強度電磁現象を高強度レーザーを用いて研究できる可能性もあるだろう[12]。

ところで高強度場は、その強い電磁場により真空の有限な領域を励起する。この観点から高強度場の物理とはこれによって励起された真空の物性を電子や光子などをプローブとして調べることと考えることができる。これは真空を物質に置き換えると非線形光学そのものであり、物性物理学との関連も興味深い[13]。たとえば第2.1節で述べた、低強度振動電場の印可によるシュレディンガー効果の閾値変化は、物性物理学でいうところのケルディッシュ効果と類似の現象と考えられる[6]。

また高強度レーザーの応用の中でも高エネルギー物理学と関連深いのはレーザー加速であろう。高強度場の物理とレーザー加速を含む応用は歩調を合わせて進むべき分野であることはいままでもない[14]。

3 世界の状況

最初にも述べたように、レーザー技術の発展により、高強度場を実験室で作り出すことが現実となってきた。特に100 TW レベル $a_0 \sim 10^2$ のレーザーは商業ベースで設置可能な状況である。これを超える強度のレーザーも各国のレーザー関係研究所で開発が進んでいる。我が国では原子力機構関西光科学研の J-KAREN が PW, 大阪大学レーザー研 GEKKO-EXA が10 PW クラスのレーザー施設である。英国ではSTFCの Vulcan が10 PW を2014年に(現在は1PW), フランスでは Appolon が2013年に10 PW を達成することを目指している。また米国でも LLNL で NIF(数百 W から PW のレーザーを需要によって供給)が稼働を開始した[15]。

このようなアクティビティの中で、ヨーロッパでは Extreme Light Infrastructure(ELI)がEUによって予算措置を受けた。これは総額 € 8,000,000 で、物性、原子核物理、ビーム物理、高強度物理を網羅する大型レーザー科学研究施設である。レーザーも $10^{26} W/cm^2$ ($a_0 \sim 10^3$) に達するという野心的なプロジェクトである。

4 高強度場の物理の可能性

真空中における粒子-粒子散乱のような素過程にも場の強度が高くなるとその影響が現れてくる。またその研究を可能するような高強度レーザー装置が現実のものとなり、また ELI のような大型レーザー科学プロジェクトが稼働を開始した。PIF2010 はこの状況に鑑み、高強度場の物理の可能性を理論、実験の両面から検討する機会とすることを目的とした。この観点から特に高強度レーザーによる高強度場の物理の意義に関する筆者の私見を述べたい。

高強度場の物理の可能性は以下の3点にまとめることができると考えている。

- (1) 高強度場における量子場の理論の検証
- (2) 自然界における高強度場現象への応用
- (3) 素粒子物理研究のための新たな手法の開拓

(1) PIF2010 の中でも[6]で触れられている。我々が自然を記述する時に使う言語は量子場の理論であり、標準理論もその上に成り立っている。しかしここで議論しているような極限状態の高強度場下における状況は検証されているとはいえない。その意味で高強度場の物理は非常に基礎的な部分を調べるものといえる。

(2) 重イオン衝突のような加速器実験やマグネターのように、高強度場は高強度レーザー場以外でも起こる。高強度レーザーはこれらの現象解明の手段として制御可能な高強度場の供給源となり得ると考えられる。また逆に

レーザーでは実現できない高強度場の供給源として重イオン実験やマグネターなどの自然現象を捉えることができる。

- (3) は素粒子物理学としてはもっとも分かりやすい。その反面高強度場の物理がこれにどのように寄与できるか、難しい部分でもある。真空分極によるアキシオンのような粒子探索はその例であるが、その他の具体的可能性の追求が強く望まれる。

以上、駆け足であるが、高強度場の物理について会議の報告を兼ねて解説を試みた。会議の迫力あるサマリーは[16]を参照されたい。高強度レーザーを使った高強度場の物理を議論する際、たびたび話題になるのが、「結局高強度レーザーの物理は非線形 QED なのか？」ということである。筆者は上述の (2), (3) はもとより、(1) のように QED を“利用”した基礎物理として重要なテーマがあると考えている。

第 3 節でも述べたように、現在世界的に高強度レーザーを用いた基礎科学の研究計画が動き始めている。筆者らも、特に高強度レーザーを使った基礎物理研究の可能性を実験、理論の両側面から具体化しようとしている。この拙文によってこの分野に興味を持つ方が少しでも増えれば幸いである。

謝辞

文中、筆者の私見を述べているが、これは文責は筆者にあるという意味であり、高強度場の物理に関する会合を重ねてきた方々との議論がもとにあるのはいうまでもない。また PIF2010 は、組織委員会委員長磯暁氏(KEK)、プログラム委員会委員長板倉数記氏(KEK)をはじめ委員会の方々の多大な努力のおかげをもって、内容、運営ともに参加者に非常に好評であった。この場を借りて感謝したい。

参考文献

参考文献のうち、PIF2010 と記してあるものは、会議の講演である。講演のスライドはすべて

<http://atfweb.kek.jp/pif2010/program/program.html>

に掲載されている。

- [1] G. Mourou, PIF2010.
- [2] D. Burke, *et. al.*, Phys. Rev. Lett. **79**, 1626 (1997).
- [3] M. Inuma, *et.al.*, Phys. Lett. A **346**, 255 (2005).
- [4] M. Babzien, *et. al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 054802 (2006),
T. Kumita, *et. al.*, Int. J. Mod. Phys. B **21**, 473 (2007).
- [5] T. Heinzl, PIF2010.
- [6] G. Dunne, PIF2010.
- [7] H. Gies, Eur. Phys. J. D **55**, 311 (2009).
- [8] A. Lindner, PIF2010.
- [9] R. Rschutzhold, PIF2010.
- [10] S. Zhang, PIF2010.
- [11] K. Itakura, PIF2010.
- [12] K. Kohri, PIF2010,
K. Makishima, PIF2010.
- [13] T. Oka, PIF2010,
S. Nakamura, PIF2010.
- [14] K. Nakajima, PIF2010,
M. Kando, PIF2010.
- [15] H. Takabe, PIF2010.
- [16] T. Tajima, PIF2010.