

レーザーと加速器による超高強度場の物理

本間 謙輔*1・高橋 徹*2

Physics under Ultra-Intense Field with Lasers and Accelerators

Kensuke HOMMA*1 and Tohru TAKAHASHI*2

Abstract

Interactions between ultra-intense fields and electron beams from accelerators will be much different from what we have observed so far, as incoherent interactions between electrons and laser photons. It is a region where we have not experienced to date as well as where we may encounter a new field of fundamental physics. In this article we introduce examples of interactions between intense fields and electrons and discuss its aspect of fundamental sciences.

1. はじめに

LHCの稼働を迎え、エネルギーフロンティアによる宇宙開闢の瞬間に迫る研究は大きな展開を目前に控えている。同時に、LHC後を見据えたりニアコライダーの開発研究も国際規模で推進されている。またKEK-BやJ-PARCに代表されるインテンシティブフロンティアの研究も着実に成果をあげるとともに、物質の起源の追求に迫る展開を図ろうとしている。

一方、20世紀後半以来、急速な発展を遂げている高強度レーザーは、超高強度場という新たなフロンティアを提供する可能性がある。加速器によるエネルギーとインテンシティブのフロンティアは、相互作用に関わる量子のエネルギーと密度の観点から極限を目指すものである。それに対して、“場”は量子がコヒーレントに集まった状態であり、反応断面積そのものが、場の強度の関数となるような、量子と量子との相互作用とは異なる側面を創り出す。また量子と量子のような点で起こる反応に対して、ある程度（例えばレーザーの波長程度）の広がりを持った領域の影響が顕在化する可能性もある。このような現象は、物質中においてはそれほど珍しくないが、真空中では非常に大きな場の強度が必要とされるため、近年の大強度レーザーの発達によりようやく研究が可能となったところである。超高強度場における相互作用は、必然的にその背景の真空の性質とも深い関係があると考えられ、超高強度場における物理は、エネルギーフロンテ

ィア、インテンシティブフロンティアに加え、新たな側面における素粒子・宇宙物理学の展開となる可能性を秘めている。

一般に、レーザーによる大強度場によって引き起こされる現象は、プラズマや原子核物理など非常に広範囲の内容を含むが、本稿では、大強度レーザーが作る超高強度場および、超高強度場と電子線加速器の組み合わせによる基礎物理について概観する。大強度レーザー場の物理全般に関する考察は文献1)に詳しい。

2. 超高強度場とは

本稿で言うところの“場”とは、コヒーレント状態、またはその極限としての古典場を指している。最近はBose Einstein Condensation (BEC)のように原子のコヒーレント状態も実現されているが、実験に供与可能な、制御可能かつ高強度の巨視的な場ということになると、レーザーによる電磁場しかない。レーザーによる電磁場の強度を表す指標として、規格化された電場強度：

$$a_0 \equiv eE_0 / \omega_0 mc = eE_0 \lambda_0 / mc^2 \quad (1)$$

が使われる。ここで、 E_0 、 ω_0 、 m 、 λ_0 はそれぞれ、電場、レーザー（光子）の角周波数、電子の静止質量、レーザーの波長である。表式からわかるように、 $a_0 \sim 1$ というのは、電子がレーザー中をその波長程度移動したときに、自分自身の質量に匹敵するエネルギーを場から得る電場強度である。例えば通常のコンプトン

*1 広島大学大学院理学研究科 (E-mail: homma@hepl.hiroshima-u.ac.jp)

*2 広島大学大学院先端物質科学研究科 (E-mail: tohru-takahashi@hiroshima-u.ac.jp)

散乱は電子と光子の弾性散乱として記述されるが、 $a_0 \sim 1$ になるとレーザー場中の電子の運動を考慮する必要があり、それによる高調波の発生や電子の相対論的質量の獲得： $\bar{m} = m\sqrt{1+a_0^2}$ ，がおこる．言い換えると、コンプトン散乱（電子—光子散乱）という量子力学的過程に、再び電磁場中の電子の運動という古典力学的な側面が現われるということである．

具体的なパラメータでは、波長 $1 \mu\text{m}$ 、 1 J/pulse 、 1 ps （すなわち 1 TW ）のレーザーを回折限界程度まで集光すると $a_0 \sim 1$ 程度になる．別の表現では 10^{18} W/cm^2 程度である．これから分かるように、 $a_0 \sim 1$ 程度であれば現存するパルスレーザーで実現可能であり、後述するように、この領域で電子—光子相互作用の実験がいくつか行われている．また現在のレーザー技術では、 $a_0 \sim 100$ (10^{22} W/cm^2 程度) の大強度も実現可能である．この領域になると、レーザー—電子散乱も現在我々が経験しているものとは全く異なる様相を見せると考えられる．次節では、その顕著な例として、コンプトン散乱における非線形効果を考察する．

3. レーザー—電子散乱における非線形効果

コンプトン散乱は光子と電子の弾性散乱であり、量子力学成立の過程で重要な役割を果たしたことはよく知られている．しかし、前述のように電子と相互作用する場の強度が大きくなると、単なる弾性散乱では記述できず、散乱断面積が電磁場の強度に依存する非線形効果が現われる．これは、アンジュレーターのような古典的な輻射における高次効果の量子力学版と考えることができ、高調波の発生は電子による多光子吸収：

$$e^- + n\omega_L \rightarrow e^- + \gamma$$

と考えることができる．この過程の実験的研究は SLAC において 47 GeV 電子とレーザーを用いて行われた²⁾．その後も 10 keV 電子と阪大レーザー研の T6 レーザーによる実験(広島—阪大—KEK グループ³⁾)、BNL における 60 MeV 電子と CO_2 レーザーによる実験^{4,5)} が行われてきた．また最近では、入射レーザーの偏極の影響など、より精密な測定が行われようとしている⁶⁾．SLAC では、レーザー—電子散乱によって生成された 30 GeV の高エネルギー光子とレーザーの相互作用により、電子陽電子対生成も観測されている．これは高エネルギー光子と多レーザー光子の反応、いわゆる非線形 Breit-Wheeler 過程；

$$\gamma + n\omega_L \rightarrow e^- + e^+$$

であり、この実験では $n=5$ に相当する反応であった．

以上の実験により、QED における非線形効果はある程度実験的検証を受けてきたが、みな高々 $a_0 \sim 1$ の領域である．すなわち、非線形効果であっても、電場による電子の運動は亜相対論領域であり、その取り扱いも多光子反応として摂動的記述が可能な範囲であった．しかし $a_0 \sim 100$ のような超高強度場になると、光子—電子反応や光子—光子反応も全く異なった様相を見せると考えられる．そこでは、レーザーは、光子としての反応ではなく、準 DC 的な古典場として電子と相互作用し、それによる輻射も大きな加速度を受けた電子による輻射となる．例えば KEK-ATF が供給するような、 1.3 GeV の電子線に $a_0 \sim 100$ 相当のレーザーを照射すると、 4 MeV 程度の γ 線が極めて多量に発生すると考えられている．このような状況は理論的には予想されるが、未踏の領域であり、現実の電子ビームとレーザーによる実験的研究が待たれる．加えて、次節で解説するような、時空の構造にも迫ることが可能と考えられ、非常に興味深い．

最後に、真空中からの対生成に関して簡単にふれておく．真空中に非常に高い電場をかけると、真空中でさえ放電を起こすことが理論的には考えられる．これは Schwinger 効果として知られており、電子のコンプトン波長の距離でその静止質量程度のエネルギーを電場から受ける状況：

$$E\lambda_e > mc^2$$

で起こる．ここで λ_e は電子のコンプトン波長 ($\lambda_e = \hbar/mc \sim 3.0 \times 10^{-13} \text{ m}$) であり、 $E \geq 10^{18} \text{ V/m}$ となる．レーザー強度としては約 10^{30} W/cm^2 であり、現状のレーザーで達成可能な 10^{22} W/cm^2 とは、まだ大きな隔りがある．しかし、ATF のような 1 GeV 程度の電子からみると電場は γ 倍され $\sim 10^{29} \text{ W/cm}^2$ となる．すなわち真空中の非線形現象が顕在化する Schwinger 場近傍の現象が、既存の電子加速器と建設可能な大強度レーザーを用いて探索できると考えられる．

4. 高加速度場からの熱輻射

電子は荷電粒子の中で最も軽いため、電磁場内の局所的なローレンツ力により、大きな加速を効率よく受ける．エネルギー密度の高い光電磁場は、必然的に高い加速度を提供する場となる．また、電子のコンプトン波長と比べて光学波長域は十分に長いため、加速度という概念を安全に適用できるというメリットがある．このような高加速度場が利用できた場合、明らかにすることのできる真空の物理に、ホーキング・アン

ルー輻射と呼ばれる事象地平からの輻射がある。いわゆるブラックホール蒸発あるいはホーキング輻射⁷⁾が提唱された直後、アンルーはミンコフスキー時空中でも等価なセットアップを実現できることを提案した⁸⁾。以下、その輻射のエッセンスを述べてみたい。

図1は、一様加速度で運動する観測者（リンドラー観測者）が迎えるミンコフスキー時空中の軌跡を表している。その軌跡は、右側の2つの漸近線に囲まれた領域内Iに限定されており、決して領域II内に入るこ

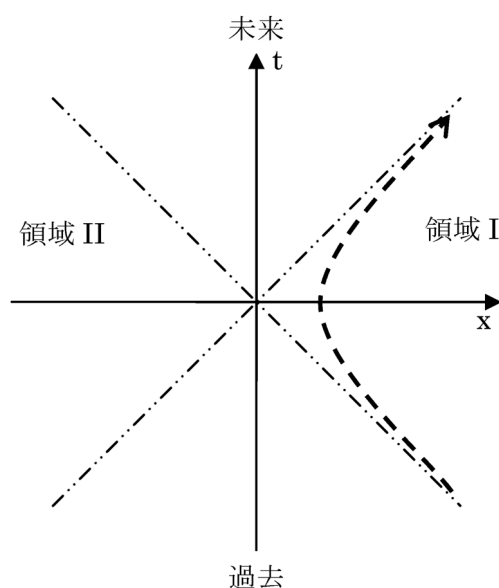


図1 ミンコフスキー時空中の一様加速度系の観測者（リンドラー観測者）の軌跡（太字破線）。2点鎖線は光速で運動する場合の軌跡，すなわち事象地平を表す。領域I，IIは事象地平によって因果関係が分けられた領域を示している。

とはない。すなわち，ミンコフスキー時空中の因果の及ぶ範囲のうち，その全ての領域に入り込むことができない状況にあり，リンドラー観測者にとっては，領域IとIIは因果的に切り離されていることになる。この因果的に切れた状態，つまり事象地平の存在が熱的振る舞いの本質となる。アンルーによると，一様加速度を感じている観測者は，加速度に比例する温度の熱浴の中に浸っている状態にとえられる。この熱分布が生じる本質は，事象地平の存在であり，これはホーキング輻射が得られるのと同じ仕組みである。図2はこの状況を模式的に表したものである。ホーキング輻射は，質量Mのブラックホールから，

$$kT = \frac{\hbar c^3}{8\pi GM} \quad (2)$$

(k, Gそれぞれボルツマン常数, Gは重力常数)で決まる熱輻射を予言したものである。一方アンルー輻射では加速度aと温度の間に，

$$kT = \frac{\hbar a}{2\pi c} \quad (3)$$

という比例関係がある。この関係式は，加速度と温度が本質的に同じであるという非常に興味深い現象を意味している。

しかし，この加速度系での熱浴が，そのまま慣性系での熱輻射になるかと言えば，その点については慎重な考察を要する。この点を詳しく議論したのもやはりアンルーである¹⁰⁾。以下では，その骨子を紹介してみたい。

リンドラー観測者の代用として，加速度運動する粒

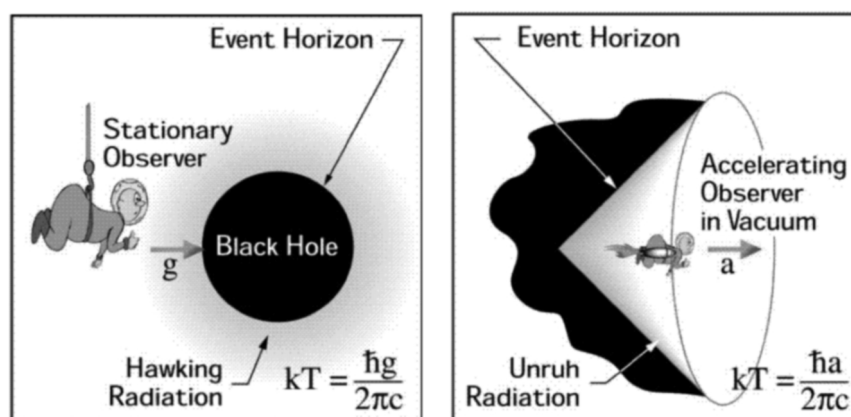


図2 ホーキング輻射とアンルー輻射の類似性

左図はブラックホールによって起こる，ホーキング輻射を表す。右図はアンルー輻射を模式的に表したもの。加速された物体からもその加速度に比例した熱輻射が予言されている。図は文献9)より引用。

子検出器という概念を導入する。検出器は、基底状態と励起状態の2状態を有する単純なモデルで置き換える。この思考実験によれば、アンルー輻射は加速運動する検出器による熱浴からの光子の吸収と放出に起因すると考えられる。領域Ⅰにある検出器の光子の吸収は、慣性系（ミンコフスキー時空）における生成（放出）に対応することを示すことができる。しかも、興味深いことに、慣性系における粒子生成は主として、領域Ⅱで起こることも同時に示される。これは領域Ⅰで起こった現象が、因果律が切れているはずの領域Ⅱの現象と相関をもっていることを示す。ミンコフスキー時空上の場が、初期状態において相関を持っていれば、因果が切れた状態でも相関を持つことは可能であることを示すことができ、近年、この因果が切れた領域間での相関に着目し、真空の量子相関を量子情報分野への応用することも検討され始めている¹¹⁾。

結局、アンルー輻射は加速度運動する測定器(粒子)がその座標系において熱浴の光子を吸収・放出する過程であり、それは慣性系にいる我々には相関のある2光子の生成として観測され得る。しかし、この輻射の解釈そのものについて、また空間次元数が増えた場合や粒子が質量をもつ場合などについて、様々な議論がアンルーの提唱以来今なお続いている。

以上が、ホーキング・アンルー輻射の概略であるが、以下では、この熱輻射の検証可能性について述べてみたい。この検証に高強度レーザーによる加速度場を用いることを、はじめて提案したのはP. ChenとT. Tajima¹²⁾である。電子を上述のリンドラー観測者あるいは、粒子検出器とみなして、高強度レーザー場中に浸すことを提案しているのに加えて、この論文の特筆すべき点は、加速度方向がバックグラウンドとなるラーマー輻射のブラインドスポットとなり、そこで最大のS/Nが得られることを指摘した点である(図3)。しかし、この論文では、熱輻射の部分で1次の結合で表現しており、上述のリンドラー系の検出器(ここでは電子)が吸収のみを起こす場合を論じている。一方、R. Schützholdらは、輻射が完全な熱輻射になることの観測よりは、リンドラー系の1電子が熱的光子吸収・放出する過程が連続的に起こる点にむしろ着目している¹³⁾。この場合、リンドラー系において、電子は光子とトムソン散乱をしていると考えたと描像が捉えやすい。つまり、光子の吸収により、電子が仮想的に励起し、光子を連続して放出すると考えると、上述の粒子検出器を概念的には満たすことになる(その等価性が、厳密に示されているわけではない)。慣性系での解釈としては、この吸収・放出は2

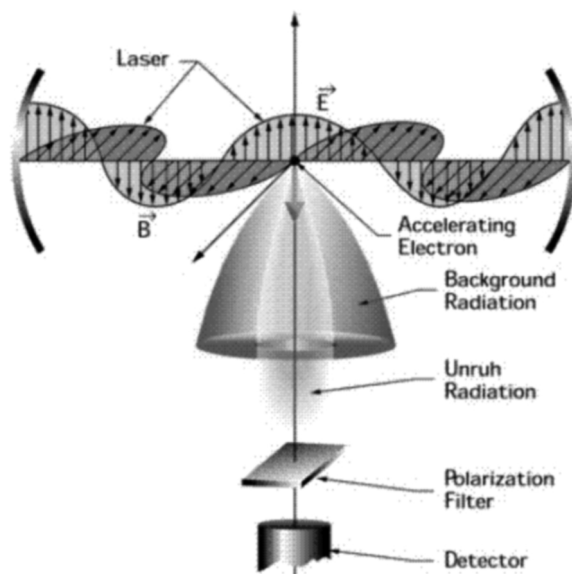


図3 アンルー輻射とバックグラウンド輻射のブラインドスポットとの関係

グラウンドとなる通常の輻射(ラーマー輻射)は加速度と垂直な方向にでる。一方アンルー輻射は等方的な輻射(がブーストされたもの)であるため、偏光したレーザーの電場の方向と、電子の入射方向を調整する(詳細は本文参照)ことにより、S/Nを向上されることができる。図は文献9)より引用。

光子の放出となる。その際、熱浴の温度が電子の静止質量に比べて低い場合、その反跳効果が無視でき、電子は加速度系の各固有時において鏡のような役割を果たすため、入射光子と出射光子は、その運動量・角運動量に強い相関を持つはずである。すなわち、慣性系で放出される2光子は、それが連続的に起こる場合には、特徴的な2粒子相関を持つことが期待される。したがって、ブラインドスポットにおいて、輻射の2粒子相関および、その熱的なスペクトラムを測定することにより、真空からの熱輻射の特徴を検証することが、原理的には可能となる。

近年のレーザーの高強度化の進歩は目ざましく、PW規模の超短パルスレーザーが利用できつつある。PWクラスのレーザーであれば、その電場強度は、 10^3 TV/mにもなり¹²⁾、(3)式で表されるアンルー輻射の温度は60 eV程度に達する。この波長域を測定することは不可能ではない。しかし、電子加速器と組み合わせて、電子を慣性系においてあらかじめ相対論的な速度領域に到達させた後、さらにレーザーで加速した場合輻射温度を青方偏移させることが可能になり、実験室系においてより簡単に高精度に測定できる波長域での検証が可能になる。例えば1 GeV程度の

電子線を用いれば、輻射光子のエネルギーは 200 keV 程度となる。さらに、本質的に等方的な熱輻射であるアンルー輻射に対し、バックグラウンドであるラーマー輻射は加速度方向には輻射されない。この性質を利用すると、レーザーパルスの伝播方向と直角に（レーザー横電場の最大加速方向に平行に）電子ビームを交差させることにより、バックグラウンド輻射のブラインドスポットでの測定を行うことが可能となる（図 3）。著者らは、TW レーザーと線形電子加速器による X 線測定実験において上記セットアップおける測定を行うなど、アンルー輻射検出へむけた基礎研究の観点からも有用なデータを蓄積している^{14,15}。

5. まとめに代えて～超高強度場を使った物理の意義と展望～

レーザー電子散乱を例にとり、超高強度場が起こす現象について述べたが、ここではその意義と展望についてふれてみたい。

非線形レーザー—電子散乱の節で述べたように、 $a_0 \sim 100$ に達するような超高強度場においては、電子からの輻射が、現在我々が経験しているものとは、全く異なる様相を見せると考えられる。これは原理的には我々の知っている量子電磁気学（QED）で予言可能であるはずだが、実際には複雑な非線形現象であり、観測と理論の比較検討が必要であろう。

我々は、ここにそれ以上に意味がある可能性を考えている。非線形効果はマイクロには真空分極の効果である。最近、真空内の静磁場中を伝播する直線偏光したレーザー光の偏光面が回転する徴候を PVLAS 実験が報告した¹⁶。この効果に対して、磁場とレーザー場が真空中の未知擬スカラー場に結合し、検出器を逃れていくという解釈がある。その後、否定的な結果が報告されつつも、世界中で別のアプローチが検討され始めている。このような実験は、電磁場下の真空の性質を通した、未知の素粒子探索の好例であろう。超高強度電磁場を用いて、類似の測定を行った場合、結合の小さな未知の長距離力の関与など、単に QED で期待される高次効果以上に、背景真空との関わりを議論できる可能性が開けるかもしれない。

また前章で述べたように、アンルー輻射についてはその輻射の解釈そのものについて理論的な決着がつかないなど、時空の構造に関して実験室レベルのプ

ローブとなる可能性を秘めている。

超高強度場レーザーと加速器の掛け合わせは、現在の加速器によるエネルギーフロンティア、インテンシティフロンティアという、量子と量子の局所的相互作用の追求に加えて、場という巨視的な構造と素粒子との相互作用や相対性理論の未検証領域、“巨視的な素粒子物理学”に踏み込む可能性を持っていると考えられる。光波長域の超高強度電磁場の研究が、我々が足を踏み入れたことのない領域に一石を投じることを期待したい。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、日本原子力研究機構関西研究所（原研関西）、高エネルギー加速器研究機構（KEK）、大阪大学、広島大学の共同研究者との議論を参考とさせていただいた。共同研究者全員に感謝したい。特に KEK の田島俊樹特別教授と原研関西の近藤公伯研究主幹には本稿の原稿に関してコメントをいただいた。この場を借りて感謝の意を表す。

参考文献

- 1) G. A. Mourou, T. Tajima and S. Bulanov, *Rev. Mod. Phys.*, **78**, 309 (2006).
- 2) D. Burke, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **79**, 1626 (1997).
- 3) M. Iinuma, *et al.*, *Phys. Letts.*, **A346/4**, 255 (2005).
- 4) M. Babzien, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 054802 (2006).
- 5) T. Kumita, *et al.*, *Int. J. Mod. Phys.*, **B 21**, 473 (2007).
- 6) A. Doyuran, *et al.*, *Proc. Particle Acc. Conf.* (2005).
- 7) S. W. Hawking, *Commun. Math. Phys.*, **43**, 199–220 (1975).
- 8) W. G. Unruh, *Phys. Rev.*, **D14**, 870 (1976).
- 9) P. Chen, *AAPPS Bulletin*, **13**(1), 3–10 (2003).
- 10) W. G. Unruh, *Phys. Rev.*, **D29**, 1047 (1984).
- 11) P. M. Alsing, arXiv:quant-ph/0603269v2
- 12) P. Chen and T. Tajima, *Phys. Rev. Lett.*, **83**, 256–259 (1999).
- 13) R. Schuetzhold, G. Schaller and D. Habs, *Phys. Rev. Lett.*, **97**, 121302 (2006).
- 14) K. Homma, *International Journal of Modern Physics B*, **21**(3–4), 657–668 (2007).
- 15) K. Homma, K. Haruna, R. Kohara and T. Takahashi, *Laser Physics*, **16**(2), 278–283 (2006).
- 16) PVLAS Collaboration (E. Zavattini *et al.*), *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 110406 (2006), Erratum-ibid. **99**, 129901 (2007).