

X線自由電子レーザーを用いて真空を探る

東京大学素粒子物理国際研究センター

山崎 高幸

yamazaki@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

東京大学大学院理学系研究科

山道 智博, 稲田 聡明

yamaji@icepp.s.u-tokyo.ac.jp, tinada@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

2015年(平成27年)8月10日

1 はじめに

X線はレントゲン写真・CT検査やX線回折を用いた物質の構造解析などにおいて必須のツールであり、また基礎物理においてもX線天文学などで重要な研究対象になっている。しかし、素粒子実験においてX線は検出器の較正や性能評価に利用されることがほとんどであり、X線素粒子物理学などという言葉は寡聞にして聞かない。

一方で現在、国内だけでもKEK PFやSPring-8など9つもの放射光リングが存在し、また世界に2つしかないX線自由電子レーザー施設の一つであるSACLAが2012年3月から共用運転を開始しているなど、日本は世界に類を見ない放射「光」大国である。特にX線自由電子レーザー(XFEL)は現在人類が持つレーザーの中でもっとも光子エネルギーが高い(～10 keV)最新のデバイスであり、従来のレーザー(～1 eV)に比べ4桁も高いエネルギー領域での実験を可能にする。もちろん光子エネルギーが高いため単純な光子数の観点からは損をするが、波長が短いので従来のレーザーでは不可能なnmレベルの集光によって輝度を稼ぐことが可能である。

さて、この新たな光源を用いて素粒子物理学者にとって面白い実験ができないだろうか?

素粒子物理学はその名のとおりに素粒子の振る舞いを研究する学問である。しかし、LHC Run Iでヒッグス粒子が発見され、真空が何もない空間ではなくヒッグス場というスカラー場で満たされていることが明らかになった現在では、素粒子だけではなくその入れ物である真空もますます研究対象として重要になってきた。

そこでわれわれは、放射光が得意とするX線をプローブとした物質の物性研究に対応して、試料として物質のかわりに「真空」を用い、X線をプローブとして真空の性質を研究する様々な実験を行っている。この種の物性

実験では試料に磁場を印加したりポンプ光を照射した際の応答をX線をプローブにして調べるのが常道であるが、われわれの実験でも同様である。

本稿ではまずXFEL施設SACLAについて説明した後、(1)光子・光子散乱実験、(2)パルス強磁場を用いたAxion-Like Particle探索実験、(3)SACLAに同期するPWレーザーを用いた真空複屈折の探索、の3つの実験をご紹介します。それぞれ(1)XFEL、(2)パルス強磁場、(3)PWレーザーの高強度場、を試料である真空に印加した際の真空の応答をX線をプローブとして調べる実験である。

2 X線自由電子レーザー施設 SACLA

SACLAはSPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laserの略称であり、播磨SPring-8と同じサイトに存在している。航空写真(図1)からも見て取れるように、SPring-8が円形なのに対し、SACLAは直線形である。これは、SPring-8が(基本的には)蓄積リングを周回する電子ビームが曲げられる際に放射されるX線を利用する施設であるのに対し、SACLAは線形加速器で加速させた高品質な電子ビームを長尺アンジュレータで蛇行させることでX線自由電子レーザーを発振さ



図1: X線自由電子レーザー施設SACLAおよび大型放射光施設SPring-8の航空写真[2]

せる施設だからである。SACLA のアンジュレータは約 100m と長く、アンジュレータを通るうちに電子ビームは自らが放射した X 線との相互作用により X 線波長の間隔で規則的に局在するようになる（マイクロバンチ化、図 2）。マイクロバンチ化した電子ビームから放射される X 線はマイクロバンチに含まれる電子数の 2 乗でコヒーレント増幅されるため、高輝度でコヒーレントな X 線が得られることになる。これが SASE (Self-Amplified Spontaneous Emission) [1] と呼ばれる X 線自由電子レーザーの発振機構である。

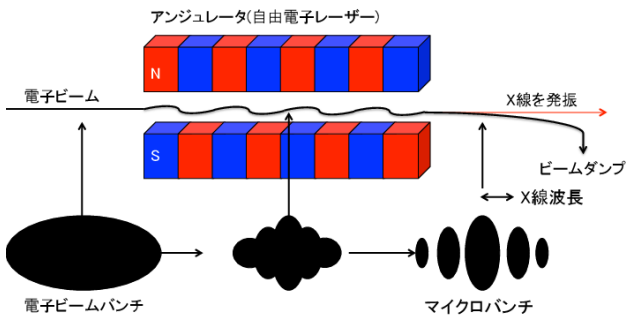


図 2: X 線自由電子レーザーにおけるマイクロバンチ化

2015 年夏の段階での SACLA の光源性能を表 1 に示す。特にパルス当たりの光子数は SPring-8 で最も高輝度なビームラインと比べても 6 桁大きく、圧倒的な輝度を誇っている。バンド幅やビームサイズは SACLA に備えられているモノクロメータや集光ミラーによってそれぞれ 50 meV, 1 μm 程度まで容易に調整でき、多段集光を用いれば 50 nm の集光も可能である [3]。

表 1: SACLA の光源性能

光子エネルギー	< 20 keV
バンド幅	30 eV (FWHM)
光子数	~ 3 × 10 ¹¹ photons/pulse
ビームサイズ	80 μm (rms)
パルス幅	< 10 fs (FWHM)
繰り返しレート	30 Hz

なお、SACLA は毎年 A・B 期の 2 期に分けて利用課題の募集を行っており、各期 10 個程度の一般課題が採択され（採択率は 40%程度）、採択された場合は数日間のビームタイムが配分される。

3 光子・光子散乱実験

それでは XFEL を用いてわれわれが行っている実験について紹介していこう。まずは光子・光子散乱実験である。光子は電荷を持たないため古典電磁気学においては互いに相互作用しない。しかし、QED で考えると光子は仮想電子対の生成消滅を繰り返して真空を励起する

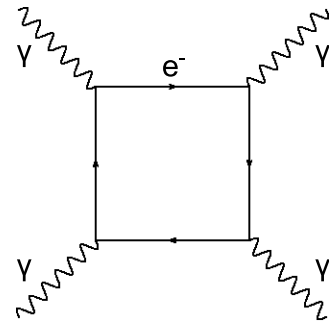


図 3: 光子・光子散乱の最低次のファインマンダイアグラム

存在であり、この仮想電子対に対して別の光子が相互作用することで光子・光子散乱が可能となる（図 3）。

これは真空の非線形性をあらわにする QED の重要な帰結であるが、ファインマン図からわかる通りこの反応は強く抑制されている。直線偏光した光子同士の散乱断面積は、光子エネルギー ω が電子質量に比べ充分小さければ

$$\sigma = 3.5 \times 10^{-70} (\omega[\text{eV}])^6 [\text{m}^2] \quad (1)$$

となり、可視光領域（~1 eV）では $\sigma \sim 10^{-70} [\text{m}^2]$ と極めて小さい。そのため、光子・光子散乱が初めて予言された 1930 年代から断続的に探索実験が行われてきたにもかかわらず、未だ観測されていない [4, 5, 6]。そこでわれわれは式 (1) における光子エネルギーの 6 乗に比例する項に着目し、可視光（~1 eV）ではなく X 線（~10 keV）を用いて真空を励起し、また X 線をプローブとすることにより、従来の実験に比べ散乱断面積が 24 桁高い領域で光子・光子散乱を探索する。

まずは最初のステップとして 2013 年に世界で初めて X 線自由電子レーザーを用いた光子・光子散乱実験を行い、X 線領域における光子・光子散乱断面積に対して 95% C.L. で $\sigma < 1.7 \times 10^{-24} [\text{m}^2]$ という上限値を得た [7]。また、2014 年にセットアップを若干改良して実験を行った。この実験について以下で詳述する。

3.1 光子・光子散乱実験 in 2014

実験セットアップの写真を図 4 に、X 線ビームを衝突させるチャンバーまわりの概略図を図 5 に示す。これらの図で X 線ビームは紙面右から左に入射し、Si 単結晶から 3 枚の薄刃を切り出して制作した Laue 型干渉計に入る。Laue 型干渉計の写真を図 6 に、Laue 型の X 線回折の模式図を図 7 に示す。Si 単結晶の薄刃に Bragg 角 θ_B で X 線ビームを入射させると、格子面で反射したビームと透過したビームに分割される。Laue 型の配置では、格子面が薄刃の厚さ方向に平行なので、Bragg 反射したビームが薄刃を通り抜けて出て来る。図 5 において 1 枚目の薄刃で 2 本に分割したビームは、2 枚目の薄刃でさらに反射波・透過波に分けられる。最終的に四つに分割されたビームのうち、1 枚目で透過・2 枚目で反

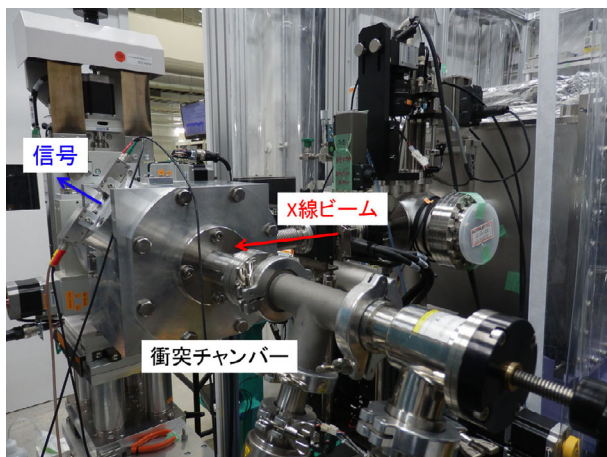


図 4: 光子・光子散乱実験のセットアップ写真

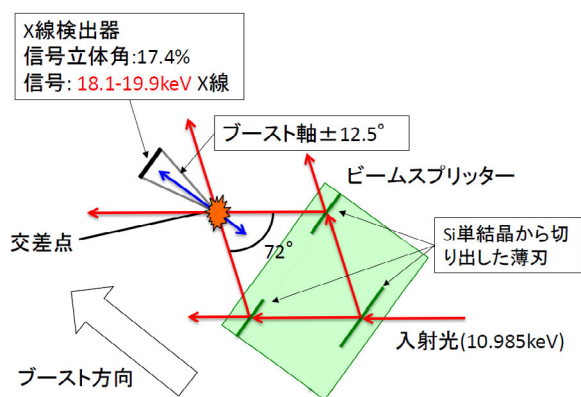


図 5: 衝突チャンバーまわりの概略図

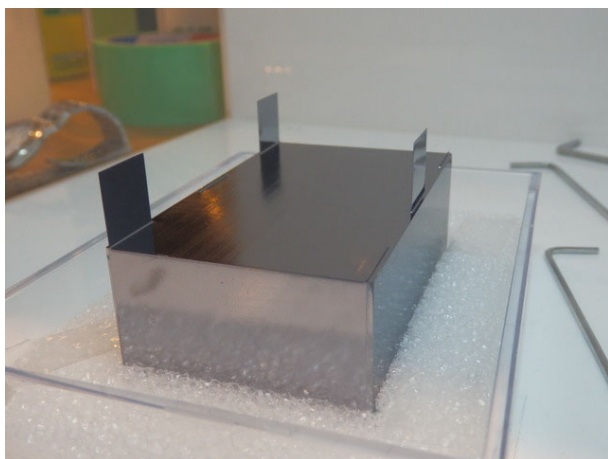


図 6: Laue 型干渉計の写真

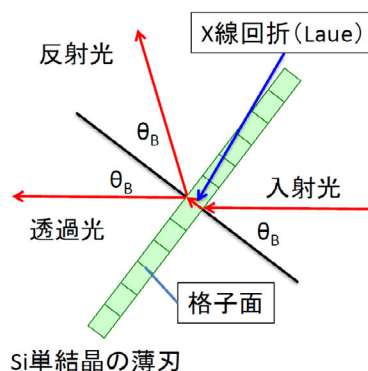


図 7: Laue 型の X 線回折の模式図

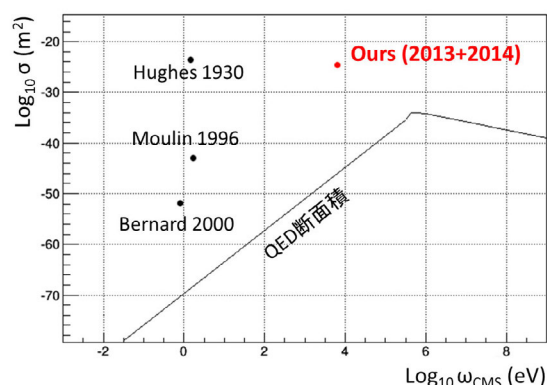


図 8: 光子・光子散乱実験において得られた散乱断面積の上限値。実線は QED 理論値を表す。

射したビームと 1 枚目で反射・2 枚目で反射したビームが交差することになる。もともと 1 本だったビームを分離させ、全く同じ光路長を進んだ後に交差させるため、空間的にも時間的にもビーム交差が保証されるという利点がある。なお、この実験では Si(440) 単結晶を用いており、光子エネルギーとしては 10.985 keV を使用した。Bragg 角は 36° であり、前方にブーストされた系になっているため、重心系での光子エネルギーは 6.5keV である。光子・光子散乱が起きた場合、前方にブーストされた 18 ~ 20 keV の光子が検出される。

このセットアップで 32 時間のデータ取得を行ったが、信号領域に事象は観測されず、2013 年の結果と合わせて光子・光子散乱断面積に対する上限値として 95% C.L. で $\sigma < 3.0 \times 10^{-25} [\text{m}^2]$ を与えた。われわれの実験を含めこれまでに行われた光子・光子散乱実験の結果を図 8 にまとめておく。

3.2 アップグレード

2013~2014 年の実験で得られた X 線領域における光子・光子散乱断面積に対する上限値は QED で予想される散乱断面積まで 23 桁及ばない。一方、可視光・赤外領域で得られている散乱断面積に対する上限値は QED 理論値まであと 18 桁である。そこでわれわれは QED 理論値に対する相対感度で過去の実験を上回ることを次

の目標としてアップグレードを進めている。

2013~2014年の実験における最大の問題点は、Si単結晶での回折効率であった。単結晶において回折が起きるにはX線の光子エネルギーと入射角がBragg条件を満たす必要がある。表1に記したとおり、SACLAの角度発散は $0.8 \mu\text{rad}$ (rms) と極めて小さいが、エネルギーのバンド幅は 30 eV と大きい。このSACLAのバンド幅に対し、Si(440)結晶で回折条件を満たすエネルギー幅は 100 meV 程度しかないため、2013年の実験ではモノクロメータ(効率 $\sim 10^{-4}$)で 60 meV のバンド幅まで単色化させて実験を行っていた。さらに、単色化させた場合でも、Laue型干渉計で2回透過・反射させる効率は数%しかないため、SACLAのビームのうち 10^{-6} 程度しか用いることができおらず、ルミノシティとしては 10^{-12} も損をしていたことになる。

これを改善すべく、現在われわれはいくつかのアイデアを検討している。その内の1つが、Si単結晶ではなくグラファイトを材料とした“モザイク結晶”[8]を用いてビームを分離・交差させることである。単結晶では結晶内の格子面が揃っているが、モザイク結晶は完全性が低く、結晶内に存在する微小結晶の向きに 1° 程度のランダム性(モザイクスプレッド)を持っている。したがって、モザイク結晶にある角度でX線ビームを入射した場合、Bragg条件を満たすことのできるX線の光子エネルギーの幅が広がる。モザイクスプレッドが 0.5° あれば回折可能なエネルギー幅が $\sim 1\%$ となるため、SACLAのX線ビームをすべて受けることが可能である。なお、Bragg条件を満たした場合の反射率は40%程度あり、十分な値である。

ただし、微小結晶の配向に広がりがあるということは、モザイク結晶で反射した後のビームの角度発散はモザイクスプレッドで決まってしまうことを意味する。たとえばモザイクスプレッドが 0.5° あれば、反射後に 10 cm 進むだけでビームサイズが 1 mm 弱まで広がってしまう。ビームサイズはルミノシティに直結するため、衝突点まわりのサイズを小さくするか別途集光する方法を開発するなどの対策が必要となるだろう。そのほかにも、ビーム同士の交差を時間的に保証する手法など、様々な課題が存在するが、SACLAの 10^{11} photons/pulseをほぼすべて交差に利用可能であるという利点は圧倒的であり、現在はモザイク結晶を用いたX線光学系の開発を第一案として検討を進めている。

4 パルス強磁場を用いた Axion-Like Particle 探索実験

次にご紹介するのは素粒子物理学で言うところのAxion-Like Particle (ALP) 探索実験であるが、より一般的に言うと、パルス強磁場に対する真空の応答をX

線をプローブにして調べる実験である。光子・光子散乱実験と比較すると、実光子ではなく仮想光子を用いて真空を励起する点に特徴がある。仮想光子で励起した真空にプローブ光を通した場合、プローブ光がアクシオンやディラトンなどの光と結合する未知粒子に変換されうる(実光子で励起させた場合には、未知粒子の質量が励起光とプローブ光のエネルギーで決まる値でなければ変換されない)。そのため、未知粒子の探索を目的として同種の実験(“Light Shining Through a Wall (LSW)” 実験と呼ばれる)が数多く行われてきたが、従来の実験ではプローブ光として主に可視光レーザーを用いており、軽い未知粒子しか探索できなかった。われわれの実験はXFELからのX線をプローブ光に用いることでより重い未知粒子を探索するものである。

4.1 Light Shining Through a Wall (LSW)

LSW実験の概念図を図9に示す。何らかの光源を用意し、そこから放射された光を磁場で励起した真空に通すと、先に述べたようにたとえばアクシオンと光子との相互作用ラグランジアン $\mathcal{L} = g_{a\gamma\gamma} a \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$ ($g_{a\gamma\gamma}$ は光子とアクシオンの結合定数。 a はアクシオン場。 \mathbf{E} は光の電場。 \mathbf{B} は印加する磁場)により光子がアクシオンに変換される。変換されなければ光路上に置かれた壁でプローブ光が遮られるが、アクシオンに変換された場合は壁を通り抜ける。通り抜けたアクシオンはそのままでは検出できないため、再び磁場で励起させた真空に通すことで先程と逆の過程を通じてアクシオンを光子に戻す。この光子は光源から放出されたものと同じエネルギーを持っており、光路上に置いた光検出器で検出されればALPの存在を意味する。検出される光子数 N_{det} は、入射する光子数を N_{in} 、印加する磁場の強さ B 、磁場領域の長さ L 、検出器の効率 η 、探索するALP質量を m_a とすると、

$$N_{\text{det}} = N_{\text{in}} \left(\frac{g_{a\gamma\gamma} B L}{2} \cdot \frac{\frac{m_a^2 L}{4\omega}}{\sin\left(\frac{m_a^2 L}{4\omega}\right)} \right)^4 \eta \quad (2)$$

となるため、強力な光源と強力で長い磁場が探索の鍵となる。また、式(2)のsinc関数部分から、探索できるALP質量領域は $m_a^2 L / 4\omega \ll 1$ であり、より重いALPを探索するには光子エネルギーの高い光源を用いるか、磁場領域(相互作用領域)を短くする必要があるとわかる。

これまで行われたLSW実験の代表例としてはHERA dipole (5 T, 8.8 m)を1個使い、可視光レーザーをFabry-Pérot共振器で1.2 kWにまで増幅して探索を行ったALPS実験[9]がある。また、最近LHC dipole (9 T, 14.3 m)を2個用いたOSQAR実験が結果をarXivに公開し、 $5 \times 10^{-4} \text{ eV}$ 以下の質量のALPに対するlimitを更新した[10]。可視光レーザーより光子エネルギーの

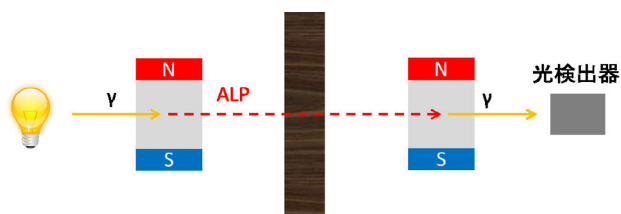


図 9: Light Shining Through a Wall (LSW) 実験



図 10: パルス磁石の写真。X 線はレーストラックコイルの内側の空間を紙面右手奥から左手前に斜めに通過する。

高い光を用いてより重い ALP を探索する実験としては、ヨーロッパの放射光施設である ESRF の X 線を用いた実験 [11] や、NOMAD グループが $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 崩壊での γ 線を用いて行った実験 [12] などが挙げられる。

われわれの実験では SACLA という強力な X 線光源を用い、さらに SACLA の短パルス性 (パルス幅 10 fs, 繰り返しレート 30Hz) に着目しこれに同期したパルス強磁場を利用することで比較的重い 0.1 eV 程度の質量の ALP を探索する。パルス磁場は超伝導磁石と異なり臨界磁場による制限がなく、DC 常伝導磁石と異なり消費電力も少なく済む。ただし、一般的に強磁場施設などで開発されているパルス磁石はソレノイドで内径が数 cm しかなく、1 時間に数発程度しか磁場が発生できないため、われわれは新たに磁場領域が長いレーストラックタイプのパルス磁石と 1 Hz 程度の速い繰り返しで磁場発生が可能なパルス磁石用電源 (コンデンサバンク) を開発した。以下でその詳細について述べる。

4.2 パルス磁石およびコンデンサバンクの開発

図 10 がわれわれが開発したパルス磁石の写真である。1 mm×3 mm の銅の平角線を 15 ターン巻いた長さ 200 mm のレーストラック型コイルである。X 線はこのレーストラックの内側を約 2° で斜めに通り抜ける。X 線が経路上で感じる磁場は一樣でなくなるが、ALP 探索において重要なのは経路にそった磁場の積分値のみ

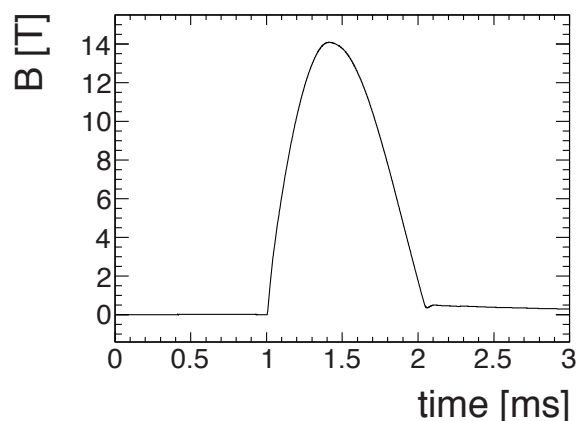


図 11: パルス磁場波形の例

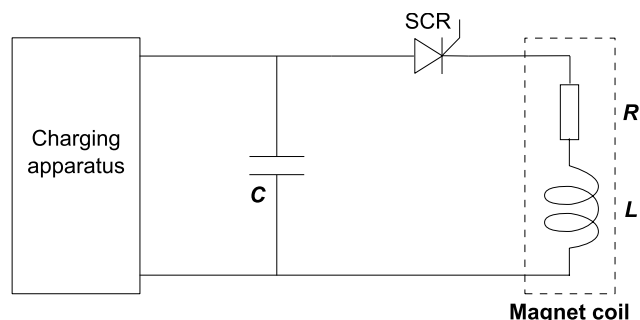


図 12: コンデンサバンクの回路図。SCR は放電スイッチであるサイリスタを表す。

であり、ダイポール磁石などと比べて構造がシンプルなので機械的な強度が得られやすい。

磁場発生領域の長さ以外の特徴としては、コイル 1 個あたりのインダクタンス $L = 31 \mu\text{H}$, 抵抗 $R = 5 \text{ m}\Omega$ とどちらも通常のパルス磁石より 1 桁以上小さいためパルス磁場を発生させた際の発熱が少なく、速い繰り返しでの磁場発生が可能な点である。

現在、この磁石では最高 14 T までの磁場発生が可能である (機械強度で制限されている)。14.1 T 発生時のパルス磁場波形を図 11 に示す。ALP 探索実験の第一フェーズでは 10 T 程度の磁場発生を繰り返す計画であり (最終的には 30 T が目標)、単発動作での強度マージンは十分だが、繰り返し運転した場合の耐久性については今後詳しく調査する必要がある。

速い繰り返しで磁場を発生させることを目的としたパルス磁石用の電源も新たに開発した。パルス磁石用の電源はコンデンサバンクと呼ばれる単純な LCR 回路 (図 12) であり、あらかじめコンデンサにエネルギーを充電しておき、放電スイッチを閉じてコイルに瞬間的に 10 kA オーダーの大電流を流すことにより磁場を発生させる。パルス幅はコイルのインダクタンス L , コンデンサの容量 C として $T = \pi\sqrt{LC}$ で決まり、ms のオーダーである。

通常コンデンサバンクは単発動作を目的として作られており、LCR 減衰振動の最初の半周期でのみ磁場発

生が行われる。コイルで消費されるエネルギーはコンデンサに蓄えられたエネルギーのごく一部であり、残りは接地抵抗を介して捨てられてしまう。コンデンサへの充電は毎回 0 V から行う必要があり、繰り返しを速くすることができない。そこでわれわれは磁場発生の際にロスしたエネルギーだけを充電するタイプのコンデンサバンクを新たに開発した。原理的にはコイル抵抗による発熱が小さければ小さいほど高速な繰り返しが可能だが、現在われわれはメカニカルな高圧リレーを用いて充電制御を行っているため、数 Hz が限界である。製作したコンデンサバンクの写真を図 13 に示す。手前側に映っている背の低い筐体に 250 μF 、耐圧 10 kV のコンデンサ（重量は 150 kg）が合計 12 個入っている。コンデンサは東大物性研の国際超強磁場科学研究施設からお借りしたものである。写真奥の背の高い筐体には、昇圧トランスや充電抵抗、放電スイッチなどが収められている。装置全体としては 4.5 kV までの耐圧があり、電源のエネルギーは 3 mF、4.5 kV で 30 kJ で、容量は 15 kVA である。サイズは床面積が約 5 m^2 でもっとも背の高い部分の高さが 2 m ある。総重量は約 2 t だが、キャスターのついた 500 kg 程度のパーツに分解して運搬可能である。この電源と先に述べた磁石 8 個を組み合わせることで、8.4 T、0.2 m \times 8 の磁場を 0.4 Hz の繰り返しレートで発生可能である。



図 13: われわれが新たに制作したコンデンサバンク

4.3 今後の予定

2015 年後期の SACLA でのビームタイムを申請しており、通れば今年中に ALP 実験第一フェーズの測定を行う。現在、磁石に X 線を通す際のアライメントや繰り返し運転のテストを進めている。すでに開発済みのパルス磁石および電源を用いて 50 時間測定した場合に期

待される感度が図 14 であり、10 ~ 100 meV の質量の ALP を世界最高感度で探索可能である。

また、最終目標とする 30 T のパルス磁場での実験に向け、並行して磁石および電源のアップグレードを進めていく。

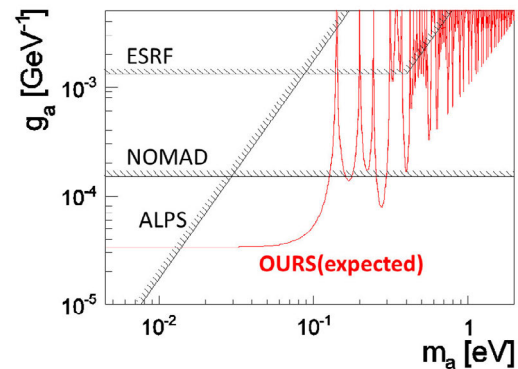


図 14: ALP 探索実験第一フェーズの期待感度。横軸は ALP の質量。縦軸は光子と ALP の結合定数。

5 XFEL と同期する PW レーザーを用いた真空複屈折の探索

最後に、今年新たに立ち上げた実験について簡単に紹介する。SACLA には XFEL と同期するフェムト秒光学レーザーが備え付けられており、フェムト秒光学レーザーを試料に照射した際に誘起される動的な現象を XFEL をプローブ光として観察する「ポンプ・プローブ実験」に利用されている。現在 SACLA の実験ハッチ 2 で利用可能なフェムト秒光学レーザーはコヒレント社製 Hydra-100 で波長 800 nm、パルスエネルギー 100 mJ、パルス幅 40 fs で繰り返しレート 10 Hz の 2.5 TW レーザーであるが、新たに THALES OPTRONIQUE 社製の 500 TW レーザー \times 2 台のインストールが進められている（図 15）。500 TW レーザーのスペックは、波長 800 nm、パルスエネルギー 12.5 J、パルス幅 25 fs、繰り返しレート 0.1 Hz である。われわれは、この強力なレーザーを集光することで強力な電磁場を発生させ、高強度場で偏極させた真空を XFEL をプローブ光として観察する、いわば「真空」を試料とした「ポンプ・プローブ実験」を計画している。

高強度場中では様々な興味深い物理現象が予言されているが [13]、本研究では特に真空複屈折を探索する。現代の知見では真空は決して「空（から）」ではなく、仮想粒子の生成消滅が繰り返されていることがわかっている。したがって、真空に外から電場を加えると、仮想電子対は電場の方向に整列し、真空に異方性が生じる（図 16）。直線偏光した光をプローブとしてこの異方性を見た場合、真空の屈折率の実数成分の異方性は複屈折性と



図 15: SACLA にインストール中の 500TWx2 のフェムト秒光学レーザー

して、虚数成分の異方性は偏光面を回転させる効果として観測される。もちろん QED で予言される効果は非常に小さいが、ALP のように光と結合する未知粒子が存在するとこれらの効果が増幅される。外から印加した電磁場に対してプローブ光が垂直偏光か水平偏光かによって ALP を生成できるかどうか決まり、ALP が仮想粒子として生成されればプローブ光の位相がずれ、実粒子として生成されればプローブ光が減衰するからである。

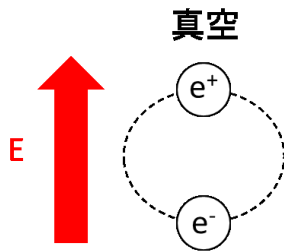


図 16: 電場によって真空は偏極する。

電磁場に対する真空の非線形応答の観測やそれを通じた未知粒子探索を目的とした実験は過去にいくつかあり、現在もイタリアの PVLAS[14]、フランスの BMV[15] などのグループが特に真空複屈折の初観測を目標として実験を行っているが、QED で予言される真空複屈折の値より感度が 50 倍悪いのが現状である。これら従来の実験のセットアップはいずれも図 17 のようなものであり、レーザーの高強度場ではなく数 T の磁石を用いてわずかな真空複屈折 ($\Delta n \sim 10^{-22}$) を生じさせ、直線偏光した 1064 nm のレーザーを通した場合に直線偏光が楕円偏光に変化するかを測定している。この手法では複屈折が極めて小さいため、レーザーを数 10 万のフィネスを持つ Fabry-Pérot 共振器で多数回反射させて光路長を稼ぎ、レーザーが獲得する楕円度 ψ を増幅させる必要がある。しかし、増幅させても楕円度は $\psi = 10^{-11}$ [rad] 程度と小さく、また光路長が長いためにノイズを拾いや

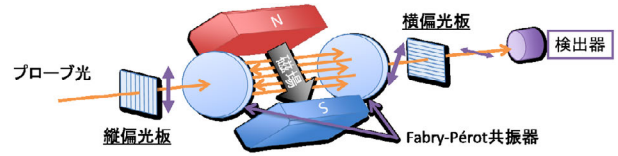


図 17: 従来の真空複屈折探索実験のセットアップ

すいなど、なかなか難しい実験といえる。

われわれの実験 (セットアップの概略は図 18) は従来の実験とまったく異なり、1 PW という強力なレーザーを μm レベルに集光することで $I = 10^{22}$ [W/cm²] という高強度場 (磁場にして 100 万 T 相当) を発生させ、これによって $\Delta n = 10^{-11}$ もの真空複屈折を引き起こす。レーザー強度 I とそれによって引き起こされる真空複屈折 Δn との関係は以下の式で表される。

$$\Delta n = \frac{2\alpha}{15\pi} \frac{I}{I_c} \tag{3}$$

ここで α は超微細構造定数、 I_c は Schwinger limit (この極限で、仮想電子が高強度場で加速されて獲得する相対論的質量が電子質量に等しくなり実粒子として飛び出せるようになる) に達するレーザー強度で 2×10^{29} W/cm² である。

SACLA の直線偏光した X 線 (波長 λ) がこの複屈折性を持つ真空を距離 l だけ通過したときに獲得する楕円度 ψ は

$$\psi = \frac{2\alpha}{15} \frac{l}{\lambda} \frac{I}{I_c} \tag{4}$$

であり、 $I = 10^{22}$ [W/cm²] のレーザーと 10 keV の X 線が正面衝突した場合には $\psi = 10^{-6}$ [rad] に達し、従来の実験に比べて 5 桁も大きい。

また、偏光測定のための素子に関しても X 線領域では消光比として 10^{-10} レベルのものが可能である [16]。これは可視光〜赤外領域における偏光素子に比べ、4 桁よい性能である。

ここまで述べたセットアップで実験を行えば、2.5 日間のビームタイムで理論値と等しい世界最高感度 (1σ) での真空複屈折探索が可能である。現在は、実験の詳細を検討するとともに、すでに SACLA で利用可能な 2.5 TW レーザーを用いたプロトタイプ実験に向け、X 線偏光素子などの設計を進めている。

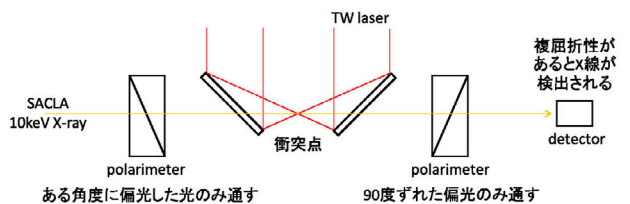


図 18: XFEL と同期 PW レーザーシステムを用いた真空複屈折探索実験のセットアップ

6 まとめ

駆け足ではあったが、われわれが X 線自由電子レーザー (XFEL) を用いて行っている 3 つの実験を紹介した。

1 つ目は、XFEL の最大の特徴である光子エネルギーの高さと集光性能を利用した光子・光子散乱実験であり、真空の非線形性をあらわにすることを目的としている。われわれは世界で初めて X 線を用いた光子・光子散乱実験を行い、X 線領域における光子・光子散乱断面積に対して $\sigma < 3.0 \times 10^{-25} [\text{m}^2]$ という上限値を与えた。現在は SACLA の性能を最大限活用した世界最高感度での実験を目指して X 線光学系のアップグレードを進めている。

2 つ目は、XFEL の高輝度かつ短パルスな X 線ビームに同期するパルス強磁場を用いて光と結合する未知粒子を探索する実験である。われわれは新たに長手レーストラック型のパルス磁石 (最大 14 T, 0.2 m) と 1 Hz 程度の速い繰り返して磁場発生が可能なコンデンサバンクを開発した。これらを用いて年内に第一フェーズの実験を行う予定である。

そして 3 つ目は、波長が短く優れたプローブ光である X 線とそれに同期する PW 光学レーザーを用いた真空複屈折探索実験である。従来の実験手法に比べ信号が大きくクリーンな測定が期待されるが、まだ立ち上げ段階であり現在は複屈折測定に必要となる X 線偏光子の設計などを進めている。

これら 3 つの実験は一見大きく異なっているが、いずれも何らかの方法 (XFEL・パルス強磁場・PW レーザーの高強度場) で励起させた「真空」という試料を、XFEL の短波長・高輝度な X 線という新たな目で観察する実験であり、真空の性質という基礎物理において重要なテーマに関する研究である。いずれの実験も今後 1~2 年のうちに結果を出すことを目指して精力的に研究を進めており、実験の進捗については随時日本物理学会やわれわれのホームページ [17] でご報告していく。今後ともご注目いただければ幸いです。

謝辞

本稿で紹介した研究はいずれも、石川哲也理化学研究所放射光化学総合研究センター長をはじめとした理化学研究所の方々および兵庫県立大学の田中義人教授のご協力の下に進めているものです。実験は SACLA のビームライン BL3 において課題番号 2013A8004, 2014B8028 として、SPring-8 のビームライン BL19LXU において課題番号 20130028, 20140024, 20150010 として行いました。ビームライン関係者の皆様に感謝いたします。

X 線検出器に関しては高橋忠幸教授をはじめとして宇宙科学研究所の皆様に大変お世話になっております。また、パルス磁石の製作においては金道浩一教授をはじめ

東京大学物性研究所国際超強磁場施設の皆様にご協力いただいています。東北大学金属材料研究所とは共同研究を行っており、特にコンデンサバンクの製作において野尻浩之教授をはじめとする皆様にご協力いただいています。最後になりましたが、われわれは素粒子センターの浅井祥仁教授および難波俊雄助教のご指導のもと実験を進めています。この場をかりて皆様に感謝いたします。

本研究は、MEXT 科研費新学術領域研究 26104701, JSPS 科研費若手研究 (B) 15K17629, 特別研究員奨励費 13J07172, 15J00509 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] R. Bonifacio *et al.*, Phys. Rev. Lett. **73**, 70 (1994).
- [2] http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/manage_structure/contacts/imageterms/
- [3] H. Mimura *et al.*, Nat. Commun. **5**, 3539 (2014).
- [4] A. L. Hughes, and G. E. M. Jauncey, Phys. Rev. **36**, 773 (1930).
- [5] F. Moulin, D. Bernard, and F. Amiranoff, Z. Phys. C **72**, 607 (1996).
- [6] D. Bernard *et al.*, Eur. Phys. J. D **10**, 141 (2000).
- [7] T. Inada *et al.*, Phys. Lett. B **732**, 356 (2014).
- [8] 村上睦明, 星敏春, 西木直巳, 放射光 **6**, 331 (1993).
- [9] K. Ehret *et al.*, Phys. Lett. B **689**, 149 (2010).
- [10] R. Ballou *et al.*, arXiv:1506.08082.
- [11] R. Battesti *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 250405 (2010).
- [12] P. Astier *et al.*, Phys. Lett. B **479**, 371 (2000).
- [13] 高橋徹, 高エネルギーニューズ **32**, 222 (2013).
- [14] F. Della Valle *et al.*, Phys. Rev. D **90**, 092003 (2014).
- [15] A. Cadène *et al.*, Eur. Phys. J. B **68**, 16 (2014).
- [16] B. Marx *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 254801 (2013).
- [17] http://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/Tabletop_experiments/Home.html