

# 真空内四光波混合による sub-eV 中性ボゾンの共鳴探索

広島大学大学院理学研究科物理科学専攻

本間 謙輔, 長谷部 孝, 久米 一輝

homma@hepl.hiroshima-u.ac.jp, hasebe@hepl.hiroshima-u.ac.jp, kume@hepl.hiroshima-u.ac.jp

京都大学化学研究所先端ビームナノ科学センターレーザー物質科学研究領域

阪部 周二, 橋田 昌樹

sakabe@laser.kuicr.kyoto-u.ac.jp, hashida@laser.kuicr.kyoto-u.ac.jp

2013 年 11 月 11 日

## 1 真空の巨大クジラ探索

私たちの目の前にある物体間を埋め尽くしている真空とは何か。仮に、実存しているとすれば、一体どのような構造を有しているのか？ 真空、あるいは時空といったほうが適切かもしれない、得体のしれない「この眼前の容れもの」は、通常光によって計量される。ただし、弱い光線を利用して。もしも計量用の光が極めて強くかつ位相が揃っている場合、一体真空は局所的にどのような応答を示すことになるのであろうか？ これは日常レーザーに触れている著者自身が抱く純粋な疑問である。アインシュタインが類似のことをいうとエレガントである。「重力ならびに空間の計量的な特性に関する筋の通った理論といえば、従来まずあげるべきものは一般相対性理論である。しかし、一般相対性理論によって電磁現象を取り扱うには、この理論のわくのなかに、別にマックスウェルの理論を取り入れることで我慢しなければならなかった。すなわち、線素  $ds^2$  を与える式で、重力場に関する座標差  $dx^\nu$  の 2 次形式のほかに、これと論理的には独立な  $dx^\nu$  についての 1 次形式を導入しなければならなかった。この係数を電磁場のポテンシャルと解釈した。また、重力場の方程式であるテンソル式には、時空の曲率テンソルのほかに - 外面的に、また論理的にも任意にプラス記号を結びつけて - 共変形に書かれた電磁場のエネルギー・運動量テンソルをつけ加えた。マックスウェルの理論が単に第一次近似の場の理論としてだけ、多くの実験結果によって支えられているにすぎないと考えるならば、上に述べたような電磁場に対する真実の場の方程式は、マックスウェルの式とは少し異なっているのではないかという疑念を一概に否定することはできなかつた。」これは、文献[1]の第一パラグラフの抜粋である。

こういった高強度電磁場に対する真空の応答は、やはり、光によって検証するのが妥当であろう。微視的にいえば光子・光子散乱、あるいは光の非線形性を通じて、真空あるいは時空の構造をなんとか暴くことはできないであろうか。

私たちは、また強度とは別の尺度を持っている。漠然と真空の光応答といっても、一体それがどのようなスケールで起こっているのかを区別しなければならない。現象が起こる時間・空間のスケール、あるいは真空の光応答のエネルギースケールである。理論は一旦忘れてみよう。LHC で発見された中性粒子は確かに 2 光子に結合する。また、中性中間子も 2 光子に結合する。これらは要するに、3 桁もエネルギースケールの異なったところで類似の共鳴点が存在している事実を示している。3 桁異なったエネルギースケールにおいて、光に結合する共鳴点が複数存在するが、別の桁違いに異なるエネルギー領域には、もはや類似の共鳴点は存在しないと想定するのはむしろ不自然であり、より一般的に探索してみたい。探索のために、エネルギーを上げるのは困難だが、エネルギーを徹底的に下げていくのは簡単である。この場合、ナイーブには共鳴の伝播距離は長くなるであろう。つまり、準巨視的なスケールにおける現象を探っていくことになる。言うなれば、「**深海の巨大イカ探索**」ならぬ「**真空の巨大クジラ探索**」を、真空の海をうんと潜って実施してみたい。この研究は、このような素朴な観点に端を発している。それでは、ロマンに満ちた探検を始めてみよう。

## 2 理論的背景

真空にどんなクジラが存在し得るのか。今風の理屈を振りかざしてみよう。暗黒エネルギー (DE)、暗黒物質 (DM) の理解は、現代物理学の最重要課題である。本研究の究極的な観測対象はディラトンと呼ばれるスカラー場の一種である。ディラトンは、有限到達距離の重力源とも捉えられる。これは、スケール変換 (グローバルな共形変換) に対して不変であったラグランジアンが、重力定数という次元を持った状態、すなわちスケール変換不変性を自発的に破る際に生じる粒子であり、その自己相互作用により微少な質量を持った南部-ゴールドストーンボゾン (NGB) であ

る。質量  $\text{neV}$  程度以上を有するディラトンが量子アノマリー結合のみを通じて重力程度の強さで物質と相互作用できると、宇宙年齢 ( $10^{60}$  プランク単位) の 2 乗に反比例して減衰する宇宙項 ( $10^{-120}$  プランク単位) が自然に導出でき、観測値を無理なく説明できる[2]。したがって、この場の存在を突き止められれば、DE の一つの有力な説明となり得る。この DE 模型は、スカラー・テンソル理論 (STT) と呼ばれる流派に属する。その特徴は、時間変動し得る定数を説明できる点にある。この背景には、重力定数が他の結合定数と比較して極めて小さいことを説明するために、定数が時間変動する可能性を考えた、いわゆるディラックの巨大数仮説に端を発して、それをヨルダンが精密に模型化した歴史的経緯がある[3]。加速膨張の発見以来、類似のアプローチとして、クイントエッセンスと呼ばれるスカラー場が、宇宙項の時間変動を生むという模型があるが、これらはむしろ現象論的に導入された原理のない模型である。ここで挙げた STT は、これらとは一線を画する。この宇宙が重力定数を選ぶ際、特定の共形系が定まるのであるが、その系において何が真の定数で、何が時間変動する定数であるかについては、共形系の選び方に依存する。自由度があるといっても、観測と無矛盾である必要がある。この特定の共形系を選ぶという過程が、まさにスケール変換対称性を破り、その結果、NGB が生まれるという考え方に基づいている。ゲージ対称性、カイラル対称性、といった素粒子論にとって馴染みのある対称性に加えて、スケール変換対称性の破れの結果生じるスカラー場である点において、素粒子論的粒子探索の対象として不足のないものである。実際この STT では、質量範囲、力の伝播距離、結合の強さといった力学的な性質まで予言されており、実験的検証に足る理論模型である。このスカラー場の質量が  $\text{neV}$  程度であれば、その伝播距離は  $100\text{m}$  のスケールであり、まさしく、真空のクジラと呼べるサイズである。過去においては、第 5 の力として探索されたこともある[4]。一方、その物質場との結合は、重力的であるが故に、これまでの地上探索網にはかかっておらず、まさに、ハンター冥利に尽きるクジラである。

実験の立場からすれば、交換される未知場の質量  $m$  と光子との実効的な結合定数  $g/M$  ( $g$  は無次元量で光子との結合を想定するならば  $\alpha_{\text{QED}}$  程度、 $M$  はエネルギーの次元を有する) さえ与えられれば、未知場の理論的背景に依らず、散乱実験による一般的な探索が可能となる。例えば、ヒッグス場と 2 光子の結合であれば、 $M$  として真空期待値つまり、 $100\text{GeV}$  の桁を想定すればよい。究極的に実験の感度が重力結合、すなわち、 $M = M_{\text{Planck}} \sim 10^{18}\text{GeV}$  へ至るのならば、それよりも強い結合領域に予言される軽い DM の候補は、必然的に観測網にかかる。強固な理論的背景を持つ、軽い DM の代表格としてのアクシオン (擬スカラー場) は

当然探索対象となる。QCD ラグランジアン CP 対称性は、QCD の非摂動真空構造 ( $\theta$  真空) を色濃く反映している。 $\theta$  真空の位相値は、元来任意でよい (CP 非保存) にも関わらず、実世界では極めて良い精度でゼロ (CP 保存) となっている。このため自発的に位相値をゼロに収斂させる機構が必要となる。アクシオン場は、このために導入された Peccei-Quinn 対称性の破れに伴う NGB である。 $\pi$  中間子は元来 NGB として考えられたが、その実質量を説明するためには、カイラル相転移が起る  $200\text{MeV}$  付近の QCD 非摂動真空を介した擬 NGB 化が必要となる。アクシオン場についても同様であるが、その擬 NGB 化過程を理解することは、QCD 非摂動真空構造の理解に加え、宇宙論的にも重要課題となる。この転移によって得られる質量に依っては、DM の有力な候補になり得るからである。例えば、 $M = M_{\text{GUT}} \sim 10^{16}\text{GeV}$  かつ  $m = 10^{-4} \sim 10^{-6}\text{eV}$  であると、アクシオンのみで DM を説明し得る[5]。

こういった理論的背景から、 $\text{sub-eV}$  の共鳴探索は確かに DE や DM といった現代物理学の最重要課題に関連しており、十分意義のある探検なのである。

### 3 探索手法

それでは、どのような探索手法があり得るのか模索してみよう。まずは重心系エネルギーを下げて共鳴点の直上を狙うことを考える。厳密な共鳴点上では、弱結合定数部分が分母分子で相殺するからである。ではどのように重心系エネルギーを下げるのか。もしもコライダーで衝突エネルギーを  $\text{neV}$  程度にするには、 $100\text{m}$  の波長をもった光子同士をぶつけなければならない。無理である。通常、重心系エネルギーを上げるためにコライダーを作っているのであるが、その真逆の発想、つまりほとんど正面でぶつけないことが重要である。そこでわれわれは、準平行系 (Quasi Parallel System) というものを考案した[6]。図 1 のような衝突幾何学を考えた場合、その重心系エネルギーは、入射光子のエネルギーを  $\omega$ 、任意に選ばれる 2 光子のなす角を  $\theta$  とすると、 $E = 2\omega \sin \theta$  と表現される。この式から、重心系エネルギーを調整するのに、われわれは光の入射エネルギー

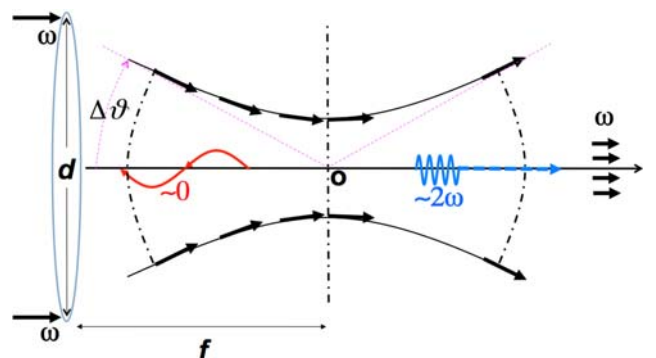


図 1 光子・光子準平衡衝突系(QPS)における周波数シフト

と入射角という2つの実験的ノブを持っていることが分かる。現代技術で最も強い光子場を作る手法としては、レーザーしかないであろう。また、できるだけ低いエネルギーのうち、単一光子の検知を可能する波長域は可視光周辺である。したがって光のエネルギーを1eV程度として、あとは長い焦点距離で光を絞れば、必然的に極低エネルギーの重心系エネルギーをもったQPSを内包することになる。図1にあるように、概念的にはレンズでレーザーを絞るだけで、なんと桁違いに低い重心系エネルギーを実現する光子・光子コライダーになっていたのである。

QPSには、特筆すべき点が複数ある。第一に、QPSでは相互作用が周波数シフトとして観測される点である。QPSは、CMSの衝突軸に垂直な方向へ鋭くローレンツ・ブーストした系と解釈できる。したがって、QPSにおける光子・光子衝突で、未知場が共鳴的に生成・崩壊する過程において、崩壊後の光子は、その出射方向に応じた周波数シフトを起こす。これはあたかも単色レーザーの集光点から別の色の光が飛び出してくるような現象に映るであろう。第二に、QPSでの重心系エネルギーは極めて低いため、標準模型内の粒子交換による相互作用がほとんど寄与しないことである。もっとも寄与が大きいものとしては、QED過程の光子・光子散乱（いわゆるボックスダイアグラム）が期待される。しかし、その全断面積は重心系エネルギーの6乗にスケールするため[7]、sub-eV領域ではほとんど効かなくなる。例えば、重心系エネルギーが1eV程度ですら、その全断面積は $10^{-42}$  bと極めて小さい。仮に、neVのスカラール場交換に対して、重心系エネルギーをneV程度に調整できたならば、さらに54桁抑制されることになる。

しかし、ここで最大の難関が立ちだかる。結合が重力的に弱いところまで感度を持つということは、その共鳴幅は極めて狭いことを受け入れなければならない点である。または長寿命の粒子が生まれてしまうという点が良い。通常、共鳴点を狙う実験では、そのビームエネルギーは正確に調整されており、そのエネルギー不定性は、共鳴幅よりも小さい。一方、レーザー光のQPSは、単一レンズで集光して作る以外現実的な方法がないため、特にルミノシティが最も高くなる集光点では、CMSエネルギーが不確定性原理に基づく光子の運動量揺らぎにより、原理的な不定性をもつことになる。例えば、LHCにおける入射グルーオンの運動量が、陽子内部のパートン分布を通じてしか指定できないことに似た状況かもしれない。今の場合、それが光の波としての性質が浮き彫りになることで不定性が生じると考えられる。それでは、共鳴の影響はなくなるのか？ 実は、そんなことはない。この不定性が原理的なものであるのならば、われわれは散乱振幅の2乗を、その不定性の範囲内で平均して求める必要があるからである。つまり、共鳴としてのBreit-Wigner (BW) 関数を、不定性の範囲にわり積

分するような効果が得られるはずである。BW分布は面白い関数で、その半値幅で積分した値と、無限大の範囲で積分した値の違いが、2倍しか違わないのである。この意味することは、もしも、重心系エネルギーの不定性が半値幅よりもずっと大きいならば、BWの積分効果の半分は保証されることになる。この積分効果により、実際、共鳴幅を一切内包しない場合と比べて、結合定数の2乗倍の反応断面積の増大が見込まれる。こういった事情は、QPSで狭い共鳴粒子を捉える場合に特有の事情であり、これを発案した当初、少なくない論文レフリーが疑念を呈したことを告白しておく。その元凶は、あくまでも光子は事前に確定した運動量値をもっているという“古典頭”である。この場合、狭い共鳴点をめつたにヒットできないため、無限に統計量が必要になるという思考に陥ってしまう。これに対して、われわれの主張は、統計量とは無関係に、たとえ一対の光子ですら、その重心系エネルギーの原理的な不定性が故に、共鳴の影響を確率的に有限量内包できるという考え方であることを強調しておく。この共鳴の積分的効果により、共鳴点直上のオーダー1の断面積は得られないが、弱結合定数の4乗ではなく、2乗に比例する散乱確率の中間的増大効果が見込めるのである[6]。クジラの姿は見えずとも、その鳴き声を通じてクジラをある海域内で捕獲したと考えることで満足するアプローチは、あり得るのである。

残念ながら共鳴の積分的効果を考慮しても、重力結合までの感度へ至るには程遠い。これでクジラ探索はおしまいか。ここで、一旦擬スカラール場であるアクシオン探索ではどのような手段が用いられてきたのか概観してみよう。現在最も弱結合まで感度を持ちえる実験として太陽アクシオン探索が挙げられる[8]。太陽内のインコヒーレント光の対により生成されるアクシオンを、地上の磁場を用いて崩壊させる方法を常套手段として探索が行われている。もう一つは純粋に実験室の実験として、太陽内のアクシオン生成のヴァーテクスを、レーザーと静磁場に置き換え、そこで生成されるアクシオンが壁を透過したのち、磁場に再結合する際に生じる光子を、壁の向こうで検知するLight Shining through a Wall (LSW) という手法である[9]。これらの手法に共通するのは、磁場による崩壊の誘導である。LSWにおける相互作用レートは、レーザーの強度に比例し、磁束密度 $B$ の4乗に比例していることを思い出しておこう。

さて、ここまで考えた共鳴の積分的効果を介した生成・崩壊は、あくまで、真空のプロセスとしてであった。もしも、静磁場に対応する背景場で真空を満たしておいたならば、何が起ころうか？ その前に、真空中にレーザー場があるといった場合に、それがどのような状態であるのか思い出しておく必要がある。一般的に、レーザーの場の量子論的な状態は、コヒーレント状態として記述される[10]。このコヒーレント状態とは、“散乱のコヒーレンス”と言葉



は似ているが、全く違う概念であることに留意して欲しい。真空状態  $|0\rangle$  に対して、励起されたコヒーレント状態  $|N\rangle$  と表現することにしよう。コヒーレント状態は、同一運動量に縮退した個数の異なった状態の線形結合として理解される。この  $N$  は、レーザー場に含まれる平均光子数である。さて図 2 を見ていただきたい。生成のヴァーテクスでは、未知場を作り出すために、コヒーレント状態から、2 光子を消滅させる必要がある。1 つ消滅させる演算子の期待値は、 $\sqrt{N}$  であることが示される。従って、2 光子を消滅させる場合、 $N$  という因子がヴァーテクスに対して、散乱振幅の段階で掛かることになる。散乱振幅の 2 乗をとって相互作用レートに直せば、 $N$  の 2 乗に比例する因子が得られる。これは、平均光子数  $N$  のバンチ同士がぶつかるときに、2 光子対の組み合わせの数が  $N$  の 2 乗になるはずであるという直感と矛盾しないが、この一致は偶然でしかない。フェルミオンである荷電粒子のバンチから衝突粒子対を古典的に選ぶ過程とは、厳格な意味では同等には扱えない。一方、真空中で生じた共鳴場が 2 光子へ崩壊する場合、真空状態  $|0\rangle$  に対して、今度は、2 光子を生成する必要がある。この場合、1 光子を生成する演算子の期待値は 1 となり、2 光子生成しても 1 であることは変わらない。したがって、生成・崩壊の振幅を 2 乗しても、レートは  $N$  の 2 乗のままである。通常のコライダー実験では、真空状態に終状態粒子を生成する、いわゆる、自発崩壊過程しか利用して来なかった点に改めて気づくことができよう。ここで上記の静磁場による崩壊の誘導を思い起こそう。もしも真空中に別の運動量状態に縮退したコヒーレント状態があったとしよう。この場合、その運動量状態への 1 光子生成の期待値は、消滅演算と同様に  $\sqrt{N}$  となる。もう片方の崩壊光子は、真空状態に対して生成することとして、その因子を 1 とすると、その散乱振幅段階の増大は、 $\sqrt{N}$  の 3 乗となり、散乱レートとしては、結局、 $N$  の 3 乗という因子になる。これは、まさに LSW の反応のレートがレーザー強度と  $B$  の 4 乗（強度の 2 乗に相当）の積となっていることと一致する。ただし、その違いは大きい。静磁場では運動量が縮退していない。コヒーレント場の場合には、運動量が縮退しているが故に、上記の共鳴条件をみたしやすい上に、観測すべき終状態の 1 光子の運動量が厳格に定まるからである。加えて、静磁場では恐らく 10T 程度までが限界であるが、レーザー場の場合にはその強度上昇に陰りが見えていない。

これらを踏まえて、生成用に  $1\omega$  のレーザー光を用意し、崩壊誘導用に  $u < 0 < u < 1$  とする  $u\omega$  の背景レーザー場を用意しておくと、エネルギー・運動量の保存則から  $1\omega + 1\omega \rightarrow$  共鳴  $\rightarrow u\omega + (2-u)\omega$  という反応を介して、崩壊時に一方の光子は  $(2-u)\omega$  というエネルギーを満たすことになる。つまり、あらかじめ 2 波長のレーザーを混在させておくことにより、真空中でパラメトリックに新たな光波を生成す

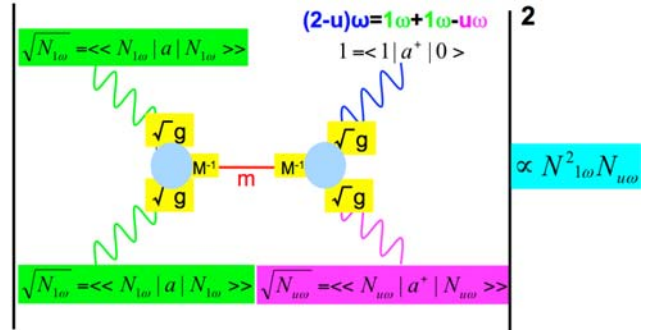


図 2 四光波混合過程による崩壊の誘導

ることが可能になる。後になって分かったことであるが、これは Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy (CARS) というよく知られた分光法そのものであり、量子光学の分野では、一般的に四光波混合過程として詳細に研究されている過程であった[11]。すなわち、上記の誘導過程は、物質中では既知の現象なのである。このような誘導過程を、原子の共鳴ではなく、素粒子の共鳴に対して、そのまま適用できるのかどうか、それ自体大変興味深い研究課題である。たとえば、既知の中性  $\pi$  中間子の崩壊を、コヒーレントな光子場で誘導崩壊させられるのかどうか、是非検証してみたいものである（可視光域レーザー場では、運動学的に難しいが）。

この  $N$  の 3 乗に比例する効果は、近未来のレーザー場の高強度化を視野に入れた場合、凄まじい効果となる。たとえば、1J の光には、 $10^{18}$  個程度の可視光光子が存在する。慣性核融合用のレーザー場としては、パルスあたり MJ 級のレーザー照射が可能となっている。つまり、すでにアボガドロ数を超えた光量をハンドルする技術を人類は手に入れている。この光量の 3 乗を考えてみると、コライダー・ルミノシティがどのように頑張っても届かない高感度領域に到達できることは自明である。後にまとめるが、以上の共鳴の積分過程と背景コヒーレント場による誘導過程の導入により、どうやらわれわれは、かろうじて重力結合へ至る感度を、現代テクノロジーの範疇で手に入れられる展望が得られるようである。真空のクジラ探索のための探査手法が原理的には整ったのである。

## 4 予備実験

それでは、クジラ探索のための具体的な実験系を考えよう。 $1\omega$ 、 $u\omega$  および  $(2-u)\omega$  は、すでに述べたように、現状では、すべて可視光付近の波長が妥当である。この条件を満たすのは、全てを同軸上に通す場合である。つまり、2色の光波  $1\omega$  と  $u\omega$  同軸上で混合し、生成した信号光波  $(2-u)\omega$  を同軸上で検知できる場合に限られる。これは、低質量の共鳴場が、QPS では集光軸方向へ鋭くローレンツ・ブーストしていることに起因している。

もう一つ、レーザーを用いることによる利点がある。それは、未知共鳴場の光子への結合様式を議論できる点にある。レーザー場の偏光状態は、ほぼ完璧に制御可能で、生成用レーザーと誘導用レーザーの偏光状態について、その偏光面も含めて自在に制御でき、かつ、信号光の偏光状態も可視光域であれば、精度よく指定できるためである。この特徴により、少なくとも、スカラー場と擬スカラー場交換の分離も可能になるし、その他の背景事象との分離も可能となる。

それでは、いよいよ実験現場の具体的な話へ移ろう。図3は、京都大学化学研究所内で広島大学大学院生らとセットアップを構築している風景である。この測定系は、互いに直交する直線偏光状態 $\{1\}$ 、 $\{2\}$ あるいは、その線形結合状態である生成場 $\omega$ と、直線偏光状態 $\{1\}$ または $\{2\}$ を指定した誘導場 $u\omega$ を、観測対象の未知場の種類に応じて選択的に混合するビーム混合部分、同軸上2色集光による準平行衝突系を実現する光子・光子相互作用部分、信号光 $(2-u)\omega$ の直線偏光状態を選んで計数する検出部分からなる。検出部分では、波長選択可能なダイクロックミラーで $(2-u)\omega$ 周辺波長の光子を、相互作用しない残余光の軌道から空間的に切り分ける。その際、混ざり込む生成場と崩壊誘導場の透過光をさらにプリズムで空間的に分離する。波長域を指定された信号光は、偏光ビームスプリッターにて直線偏光状態を指定された後、偏光状態に応じた時差をファイバー中で付けた上で、暗箱内で単一光子計数可能な光電子増倍管で検知される。その際、光電子量の時間構造を波形データとして高速で記録する。さらに、信号波長レーザー光を同軸上に導入でき、検出効率が実測できる。京大化研内で開発・運転しているTi:Saレーザーシステムのうち、 $\omega$ として $800 \pm 50 \text{ nm}$ を使用し、 $u\omega$ としてTi:Sa用の増幅用光源であるYAGレーザーからの $1064 \text{ nm}$ を用いる。その結果、物理信号となる $(2-u)\omega$ の波長域は、 $640 \text{ nm}$ を中心として $580 \sim 709 \text{ nm}$ 程度の範囲をもつことになる。

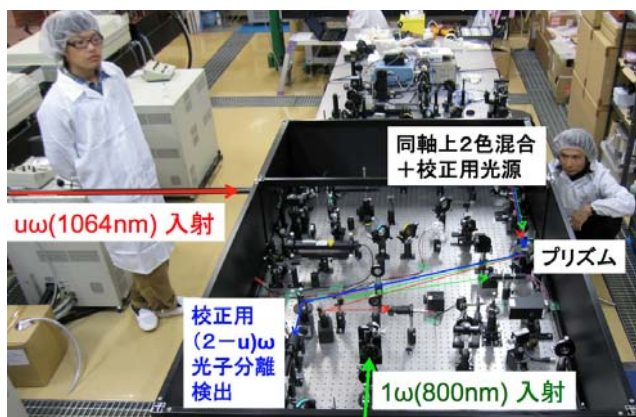


図3 京都大学化学研究所レーザー実験棟における予備実験の作業風景

この実験提案において最も困難が予想された点は、果たして同軸上にて色の違う1光子のみを選択できるのかという点であった。1Jのレーザーパルス光でも $10^{18}$ 個の光子群である。ここから本当に1光子のみを特定できるのだろうか？この問題に対して、結局は、最も単純に屈折率の大きなプリズム群を用いることで解決した。レーザー場が平面波である限り、大量の光子群は空間的に容易に切り分けられる。勿論、プリズムの表面からは球面波的な散乱も起こる。しかしながら、これらの残光成分は比較的弱い。高性能の色フィルター1枚にて、4-5桁に及ぶフィルターリングが可能となるため、これらを残光の量に応じて適当な枚数重ねていけば、十分なS/Nが得られる。高エネルギー実験における前後方のミュオンIDに似ているかもしれないが、分厚い吸収体の壁が、数センチ程度の厚みのフィルター群に置き換えられるため圧倒的に楽である。

次に予想されたのは、物質起因の四光波混合からのバックグラウンド光である。これについては、2色混合光を同軸上で集光する直前に、信号光波長に相当する光をフィルターにて落とすことにより、バックグラウンド光を減らすことができる。勿論、フィルター自体が固体物質である以上、生成と吸収のイタチごっこになるのであるが、吸収型のフィルターを用いることにより、フィルター内で生成する信号光波長域の光量とフィルター内で吸収される同波長域の光量を比較すれば、後者のほうが桁違いに大きいため、これも適度に重ねていけば落とせる。

最後に残るのは、集光点領域を囲む真空チェンバー内の残留ガスからの四光波混合光である。これについては、真空度を上げる以外に手がない。現在、実験室内で達成可能と考えられている真空度は、 $10^{-11} \text{ Pa}$ 程度である。原子数にして、 $10^4/\text{cm}^3$ 程度。しかしこの値は実のところ、真空度を測るゲージの精度の限界であるとも言われている。実際には、そのゲージの下限を振り切るほどの真空度を達成できる真空排気系も実存するため、必要に応じてその排気系を導入していけばよい。市販品で、分圧で $10^{-13} \text{ Pa}$ まで分解できる四重極質量分析器が存在するが、そのような機器を用いれば、残留ガスの成分と個々の成分の原子数までが実測可能であると見込まれる。あとは、観測された原子種ごとに圧力を上げた状態で四光波混合光量の偏光組み合わせ依存性を実測しておけば、真空内四光波混合量の測定時の真空度に応じた原子起因光量を外挿値として求められることになるであろう。

現在これらの想定を実験的に検証する準備を進めている。これまでに、単一光子感度で希薄大気中の原子起因の四光波検知に成功している。図4の4つのパネルは、生成場C、誘導場Iの有無について4つの組み合わせ：C+I、Cのみ、Iのみ、およびペDESTルの各々について四光波混合光の波長域にある光子の $60 \text{ ns}$ ゲート内の到達時間分布を示す。速い到達時間帯は、直線偏光状態 $\{1\}$ を、遅い到達時間帯は



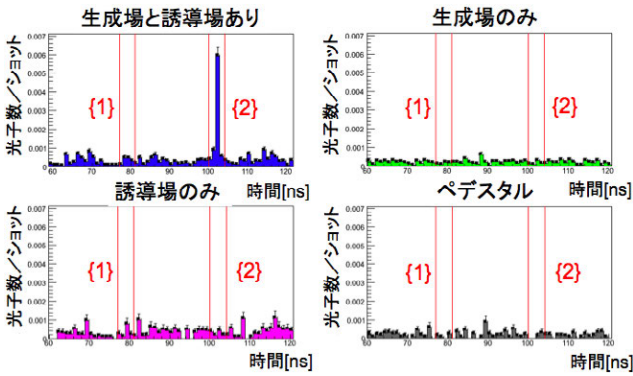


図4 10<sup>2</sup> Pa 大気起因の四光波混合光の到達時間分布

{1}と直交した{2}の場合に相当し、C+Iの時にのみ鋭い時間構造が現れる。同時に信号光の検出効率の見積が可能となっている。

### 5 展望

上記のように現時点では、テーブルトップの実験として手探りの状態で予備実験を繰り返しているが、その準備段階を経た後、特にヨーロッパで勃興している高強度レーザー場を用いた実験へ拡張することを視野に入れている。

すでに予算措置が行われている Extreme Light Infrastructure (ELI) プロジェクトのうち、著者が直接関与しているルーマニアに建設中の ELI-NP[12]について若干触れておく(図5参照)。これには~10PW(~200J/~20fs pulse)のレーザー二基が導入されると同時に、600MeVの電子線ライナックが備えられる予定のユニークな施設である。2017年に完成予定で現在プロジェクトが進行している。



図5 建設中の ELI-NP の完成予想図[12]

もう一つレーザー施設を横に繋ぐ共同体として International Zetta-Exa Watt Science and Technology (IZEST) が存在することは特筆に値する。IZEST は素粒子分野でいう CERN に似た共同体であるが、実験する場所は一拠点に限られない。世界中に存在する施設を IZEST ネットワーク内で柔軟に利用するという思想の組織体である。

本稿に特に関連する IZEST 内のプロジェクトとして、高繰り返しかつ高強度のファイバー束を基礎としたレーザー Coherent Amplification Network (CAN) を開発している(図6参照)。たとえば、四光波混合の場合、上述したようにパルスあたりのエネルギー(光子数 N)が物理的には最も重要であった。しかし、実験の系統的な側面を加味すると、やはりパルスの統計量も必須となる。CAN は国際プロジェクト ICAN として、50J/100fs、繰り返しレート 10kHz を目指して開発途上にある。このレーザーが、レーザープラズマ加速技術と融合すると、近未来のコライダー実験に応用する道も開けていくことが見込まれている。その意味においても、本研究をコライダー実験と共に進める利点がある。

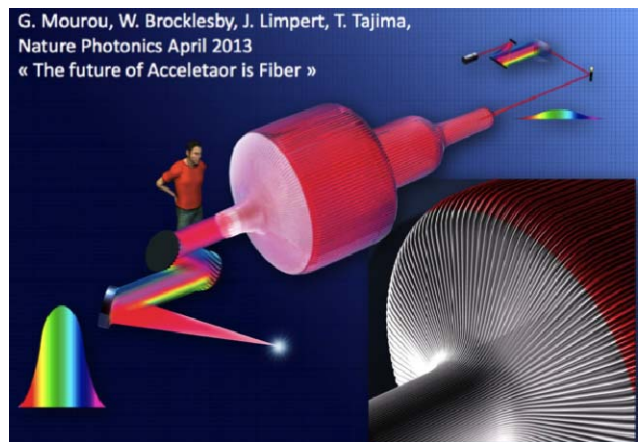


図6 開発中のファイバー束レーザーCANのイメージ図[13]

図7は、京大化研で予定している2段階の高強度レーザー場実験を皮切りに、ELI-NP、ICAN とステップアップした場合に、真空内四光波混合法で期待される未知場の質量  $m_{eV}$  と光との結合  $g/M \text{ GeV}^{-1}$  に対する 95% 信頼度の感度上限値を表している。太いピンクの水平線は、 $M$  がプランク質量すなわち重力と同程度の弱結合に相当する。赤の斜線は、ELI-NP による感度領域、緑の斜線は、開発中のファ

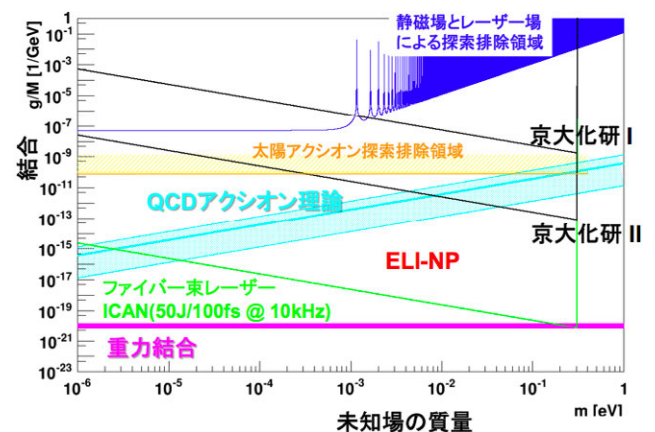


図7 質量-結合に対する予想感度

イバー束レーザー (ICAN) が利用出来た場合、重力的弱結合の感度限界を超えられることを示す。水色の斜帯は、QCD アクシオン予言域を指している。黒斜線は上記、京大化研のステージ I と II で得られる感度を示しており、レーザーと静磁場を用いた探索の限界値  $g/M \sim 10^{-7} \text{ GeV}^{-1}$  [13] や太陽アクシオン観測による限界値  $g/M \sim 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$  を、比較的重い質量領域で超えられることが見込まれる。いずれも 10 日間連続運転の統計量に基づく到達感度を示している。

## むすび

暗闇をレーザーポインターで照らすことを想像して頂きたい。もしも、暗闇にレーザービームの色のついた軌道を想像したならば、SF 映画の見過ぎである。実は、暗闇に散乱体が存在しないと、光は決して光ってみえることはない。私たちが真空とみなす対象は、物のない状態、すなわち、光らない暗い状態である。私たちの提案は、要するに、暗くて一見何もないようにみえる真空を明るく照らし、もしも、わずかな光の散乱を発見できたならば、真空だと思っていた対象の中に微かな散乱体があることを見出させるという、至極当たり前のことに過ぎない (映画スターウォーズでは、ダースペーパー周辺には暗黒場があるのだから、光線が見えていてもよいのであろう)。ただし、照らし方には色々あるということである。しかし、この極当たり前のアプローチは、革命的意義を持ち得る。ニュートンはリンゴの落下により万有引力を着想したといわれるが、これはアボガドロ数を超える質点質量の 2 乗程度の感度で重力が顕在化する好運な状況にあったからといえよう。一方、レーザー強度を 200 kJ 以上に上げられた場合、このコヒーレント場中には、平均値としてアボガドロ数以上の光学波長域の光子が存在することになる。人類がこの強度のレーザー場を制御できた場合、本研究の提案は、アボガドロ数の 3 乗で垣間見られる極微弱な現象に感度をもつ展望を与えられる。自然界に重力よりも弱い力が身近に存在することは、通常は想像すらしないであろう。将来、より高強度かつ高繰り返しレーザーが開発され、もしも、重力結合よりも弱い領域で共鳴場が見つければ、DM および DE のための解釈を超えた、ガリレオ・ガリレイ以来の最大級の実験的成果に到達できるかもしれない。

最後に、さらに別の視点を追加して本稿を閉じよう。量子光学では、分極に関する感受率を基準に、物質の光応答を議論する。物質内において四光波混合は 3 次の分極係数に起因している。この係数は電場の 3 乗に応答する項として理解される。それ故、強度の 3 乗に比例した四光波混合光量が現れるのである。ここまでの議論では、真空中の共鳴場に光子が 2 個結合するケースのみを考えてきたが、2 個以上の光子が同時に結合するケースも一般的にはあり得る。その場合、相互作用レートはレーザー強度に鋭く依存

し、比較的弱い光強度でも予想外に何かを見つけられるかもしれない。もしも、真空起因の光波混合が起こる事例が 1 つでも示せれば、真空量子光学の幕開けとなろう [14]。

## 参考文献

- [1] 湯川秀樹監修, 内山龍雄訳編, アインシュタイン選集 **2**, 28; A. Einstein und W. Mayer, S. B. Preuss. Akad. Wiss., 541-557 (1933).
- [2] Y. Fujii and K. Maeda, *The Scalar-Tensor Theory of Gravitation* Cambridge Univ. Press (2003).
- [3] 読みやすいものとして、以下の文献を挙げておく。藤井保憲著, 「基本定数の宇宙論的変動をめぐる」数理科学 2013年5月号.
- [4] Mark P. Hertzberg, Max Tegmark, and Frank Wilczek, Phys. Rev. D **78**, 083507 (2008).
- [5] Y. Fujii and K. Homma, Prog. Theor. Phys. **126**, 531-553 (2011); K. Homma, D. Habs, T. Tajima, Appl. Phys. B **106**, 229-240 (2012); K. Homma, Prog. Theor. Exp. Phys. 04D004 (2012).
- [6] Y. Fujii, Nature Phys. Sci. **234**, 5 (1971); E. Fischbach and C. Talmadge, *The search for non-Newtonian gravity*, AIP Press, Springer-Verlag, New York (1998).
- [7] D. Bernard et al., Eur. Phys. J. D **10**, 141 (2000).
- [8] M. Minowa et al., Phys. Lett. B **668**, 93 (2008); E. Arık et al. (CAST Collab.), Phys. Rev. Lett. **107**, 261302 (2011).
- [9] K. Ehret et al. (ALPS Collab.), Phys. Lett. B **689**, 149 (2010).
- [10] R. J. Glauber, Phys. Rev. **131**, 2766 (1963).
- [11] Sylvie A. J. Druet and Jean-Pierre E. Taran, Prog. Quant. Electr. **7**, 1-72 (1981).
- [12] <http://www.eli-np.ro>
- [13] Gerard Mourou, Bill Brocklesby, Toshiki Tajima and Jens Limpert, Nature Photonics **7**, 258-261 (2013).
- [14] T. Tajima and K. Homma, Int. J. Mod. Phys. A **27**, No. 25, 1230027 (2012).