光を使って真空を探る

東京大学・素粒子物理国際研究センター 難波俊雄

今日の話は、こんな人たちとやってます

- われわれのグループ:難波俊雄、樊星、周健治、山道智博、稲田聡明、山崎高幸、浅井祥仁、小林富雄(東大ICEPP、理)
- X線光学、放射光のプロ: 玉作賢治、澤田桂、矢橋牧名、石川哲也(理研)、犬伏雄一(JASRI)、田中義人(兵庫大)
- X線検出器のプロ: 高橋忠幸、渡辺伸(JAXA)、佐藤悟朗(早稲田)
- パルス磁石、電源のプロ:金道浩一(東大物性研)、野尻浩之(東 北大金研)
- レーザーのプロ: 吉岡孝高、大間知潤子、五神真(東大理、工)





場の量子論によると、「真空」≠「空っぽ」



「真空」に潜むモノ



われわれが「真空」を見る二つのアプローチ

- 1. 光で叩いて光で見る
- 2. 強場(磁場)で叩いて光 で見る





われわれが「真空」を見る二つのアプローチ



われわれの使う光 ~XFEL SACLA~



SACLA

- -世界最高強度のXFEL(水平偏光)を発振
- -光子数1.2×10¹¹photons/pulse@11keV, パルス幅10fs,繰り返し30Hz
- 1パルス当たりの光子数が大きく、パルスが短い
- -ビーム幅: 200µm × 200µm (FWHM)
- -1µmコヒーレント集光を利用
- 高いパルス強度・小さいビーム断面積→High Luminosity
- -入射光子エネルギー:10.985keV

最初に見たいモノ: QEDの予言する真空の非線形効果



- ・ QEDの予言する真空の非線形効果(Schwinger limit)
- 電荷を持たない光子同士が、電子のループを介して 散乱
- 無偏極全断面積σ(@ω<700keV)
 σ=7.3×10⁻⁷⁰(ω/1[eV])⁶[m²] (ちょう小さい!)
- 1936年に予言、いまだに観測されていない (主に可 視/赤外レーザーで検証)

X線を使えば、

- 断面積はωの6乗依存性
 →10keVのX線だと可視光(~eV)に比べて24桁もお得
- (原理的には、)ナノメーターサイズまで絞れる
- これまでに検証されていないエネルギー領域



ただし、取り扱いは大変!

- SACLAのビームは1本:

 一 衝突のためには分岐が必要
- 横1µm集光、10fs (=3µm)のパルス:
 2本のビームの衝突の保証は?



1本のX線をぶつける方法

- X線の回折を利用して分岐
 そのまま透過→透過光
 結晶でラウエ回折→回折光
- 今回の実験では、
 0.2mm厚のシリコンの刃を使用
 - シリコン(4,4,0)格子面
 - 10.985keVのX線に対して、 θ_B=36°
 - 透過、回折の効率~1/10



2回繰り返すと、



キモは、単結晶から刃を切り出すこと

・ ラウエ回折用の刃をシリコン単結晶から切り出す
 →ビームの衝突を時間的・空間的に保証



期待される散乱シグナル ~前方にブースト~

- ω_{CM}=6.46keVの系でほぼ等方散乱
- 72°の交差系では、前方に19keV程度のブーストシグナル



X線検出器:シリコン両面ストリップ検出器 (DSSD)

- DSSD (Astro-H用に開発されたもの)を使用
 - 32mm×32mm×t0.5mm厚
 - 128ストリップ×両面 (250µmピッチ)
 - エネルギー分解能(FWHM): 1.1keV@22keV
 - 検出効率: 40% @ 20keV



実験セットアップ (2014run)



測定で得られたスペクトル

・2014年データ(29時間分)



ルミノシティ&検出効率 (2014 run)



光子・光子散乱の上限に直すと、

2013年の結果: PLB732(2014)356 2014年の結果: 準備中



感度向上へ(近い将来)

- SACLA のシード化
 シード化により、SACLAの線幅が80eV→1eVに
 ビームスプリッターの効率に直結
- ブラッグ反射を利用したビームスプリッター - ほぼロス無しの分岐と反射 SOMM Bragg Bragg あわせて、7桁のルミノシティ向上 Bragg 結晶薄刃 (~10µm)

さらに将来 Braggミラー+50nm集光 & 4光波混合



われわれが「真空」を見る二つのアプローチ



鍵は磁石~強力で長い磁場で真空を叩く~

われわれの選択: 常伝導パルス磁石
 目標 30T、20cm、~Hzでの繰り返し運転



常伝導パルス磁石のメリット

- 超伝導では出せない磁場が出せる (目標: 30T)
- 磁場に依存した変化を抽出する事が容易
- ビームと同期した磁場が出せる



例: SACLAのビームと同期した磁場発生

現在のプロトタイプ磁石



すでに14Tまでの励磁は成功



電源は自作の(ポータブルな)コンデンサバンクで運用 繰り返しレート、パルス幅等は自分たちでデザイン可能

磁場で叩いて何が見えるか I ~Axion Like Particle~

- 磁場で光をアクシオンのような未発見粒子に変換
- Light Shining through a Wall (LSW) 方式で探索
- 変換効率 ∝(磁場)²×(印加距離)²



- X線光源を用いれば可視光よりも 1-2桁重いALPを探索可能
- パルス磁石を用いてSACLAとの同期運転

アクシオン探索での(控えめな)期待感度

- 黒:先行実験
- 赤: SACLA, 2.5 daysで線の上側の領域を棄却(95% C.L., <u>expected</u>)



2015B SACLA ビームタイムを要求、測定予定

磁場で叩いて何が見えるか||~真空の複屈折~

QEDの予言する真空の複屈折



印加した磁場の方向に応じて 真空の屈折率が変化する!

$$n = n_{//} - n_{\perp}$$

= $k_{CM} B^2$ (QED理論値
 k_{CM} =4.0×10⁻²⁴[T⁻²])

感度∝(磁場)²×(光路長) →強磁場と高いフィネスの共振器が重要 (X線ではなく、可視/赤外光が有利)

Λ

セットアップ

<u>パルス磁石</u> 繰り返しの速いパルス磁場 で感度を上げる



最終的に、30T、0.8m、6Hzの磁石と、フィネス450,000の共振器を 使えば、競合グループ(PVLAS、BMV)を3桁上回る感度 (2時間で真空の複屈折の初観測が可能)

Fabry-Pérot共振器



Fabry-Pérot共振器



まとめ

- 場の量子論が予言する豊かな真空の状態
 - ベンチマークとしてのQED
 - 未知の場も
- 光をプローブにして様々な手法で真空を探索
 - 光•光衝突 (21pDF4)
 - パルス強磁場を用いたALP探索 (21pDF2、 21pDF3)
 - 高いフィネスの共振器と組み合わせた真空の複 屈折探索 (21pDF8)
- ここ数年でいずれも結果を出す予定(ものに よっては手近なところから)

