

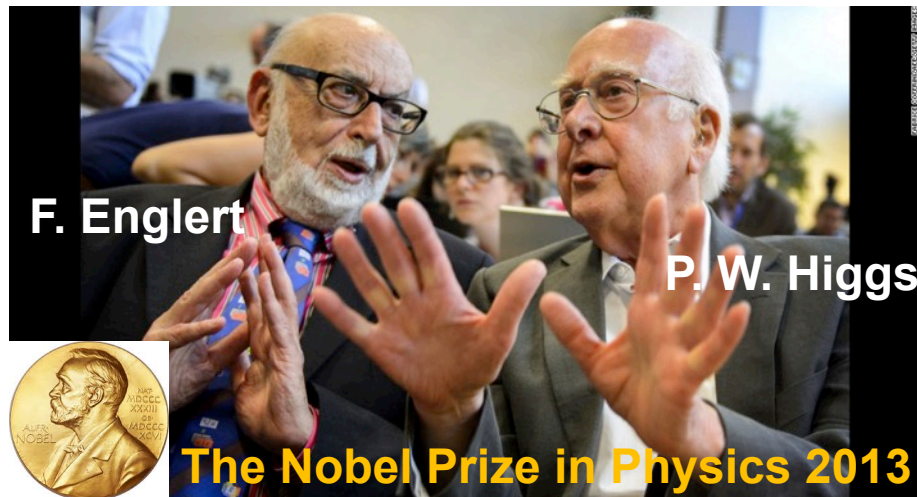
X線自由電子レーザー施設 SACLAにおける真空複屈折 の探索

山崎高幸

東京大学素粒子物理国際研究センター

素粒子から真空へ

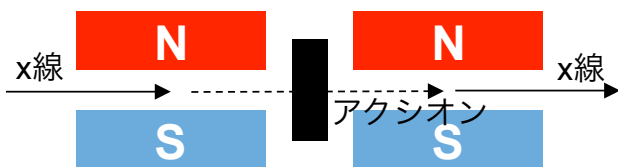
<http://edition.cnn.com/2013/10/08/world/europe/sweden-nobel-prize-physics/>



- 2012年7月ヒッグス粒子の発見・2013年ノーベル物理学賞受賞は、真空が「空」ではなくその内部にはヒッグス場が隠されていることを明らかにした（そして励起させるとヒッグス粒子が飛び出す）

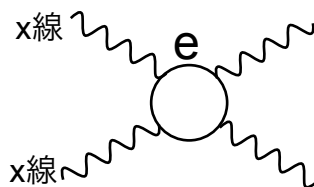
- ヒッグス場は見つかったが、他にもaxion, dilaton, inflaton, dark energyなど、真空には様々な場が隠されていると预言されている
- 素粒子だけではなくその入れ物である真空を励起し隠された性質を調べることが重要。我々はこれまで以下の実験を行ってきた

1. Axion探索



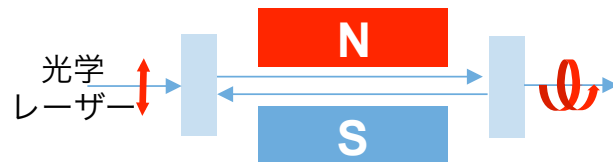
磁石で励起してX線で探る

2. 光子・光子散乱



X線で励起してX線で探る

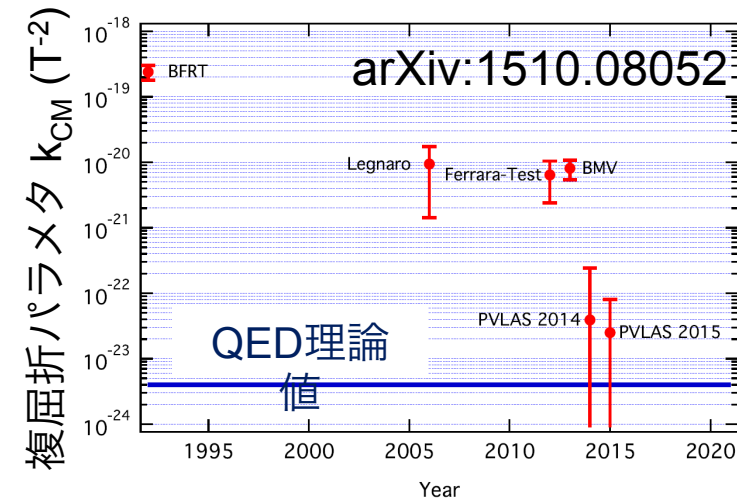
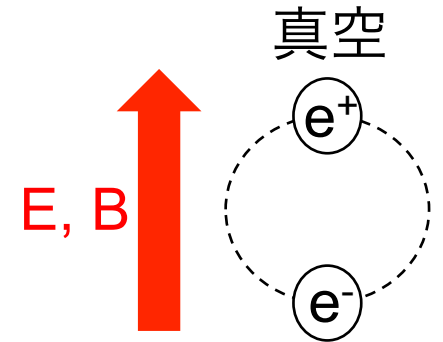
3. 磁石での真空複屈折探索



磁石で励起して光学レーザーで探る

真空複屈折

- 真空は仮想的な粒子の生成・消滅を繰り返している。この仮想的な粒子対に対して電磁場を印加すると真空が分極し、真空が異方性を持つ→真空複屈折（QED真空の非線形効果）
- また、Axionなどの未知粒子が存在すれば、真空複屈折が大きくなる
- 1990年代から数Tの磁石を用いて真空を励起する手法での実験が複数行われたが未観測。現在の世界最高感度は 1σ で理論値の10倍にまで迫っている

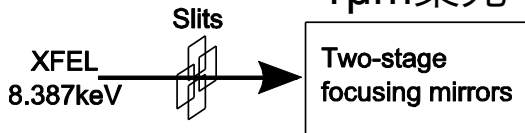


本研究では、数Tの磁石ではなくハイパワーレーザーの高強度場 ($I > 10^{22} \text{W/cm}^2$, $B > 10^6 \text{T}$) によって真空を励起することで $\Delta n = 10^{-11}$ (従来手法では $\Delta n = 10^{-22}$) の真空複屈折を引き起こし、X線をプローブに用いて真空複屈折を探索する

真空のポンプ・プローブ実験

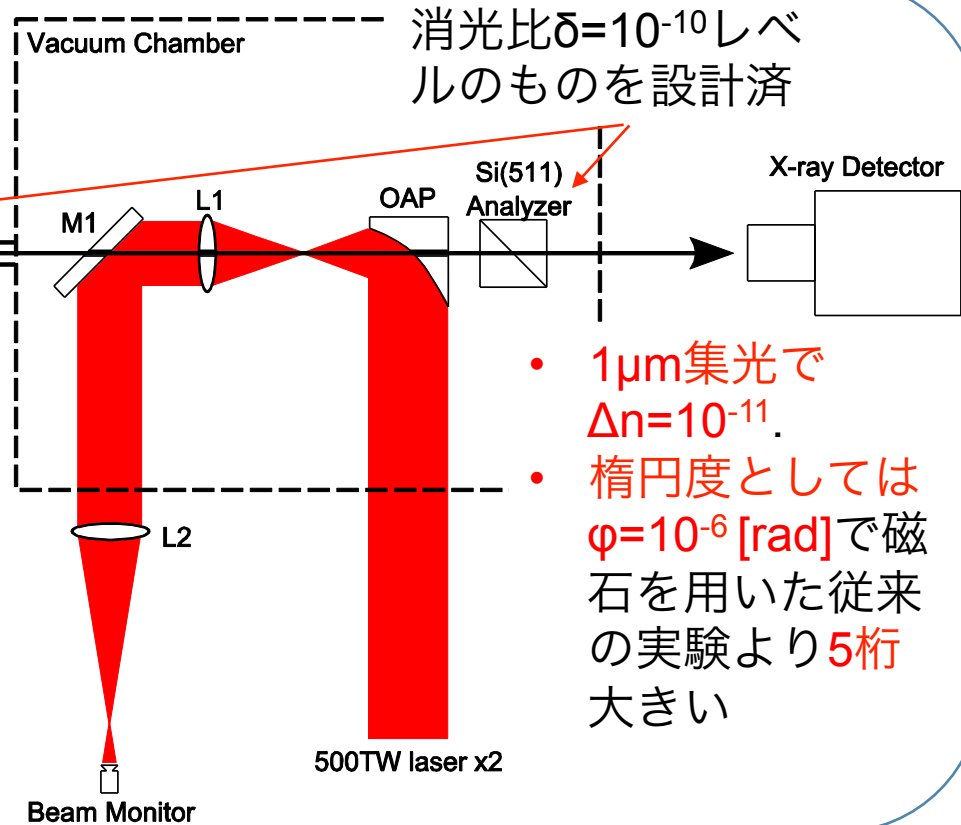
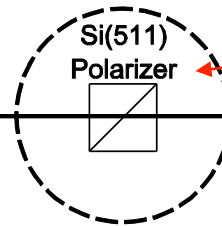
EH3, 4

角度発散
を抑えて
1 μ m集光



- シード化により1eVに単色化
- レーザーと同期した1Hzの振り分けでよい（その分ビームタイムを長くしたい）

EH6



- 1 μ m集光で $\Delta n=10^{-11}$.
- 楕円度としては $\varphi=10^{-6}$ [rad]で磁石を用いた従来の実験より**5桁**大きい

- プローブにX線を用いることで、可視光プローブに比べ、獲得する楕円度 $\varphi=2\pi(L/\lambda)\Delta n$ が4桁大きくなり、消光比の良い偏光素子 ($\delta=10^{-10}$ 。可視光だと $\delta=10^{-6}$) を用いることができるため、S/Nの良いクリーンな測定が可能

予想感度

- 以下を仮定した場合、ビームタイム1回（2.5日）の測定で真空複屈折のQED理論値（ $k_{CM}=4.0 \times 10^{-24} [T^{-2}]$ ）と等しい感度（ 1σ ）で探索可能
 - SACLA : 5×10^{11} photons/pulse
 - 500TWx2 (1Hz) 1 μ m集光で衝突直後の楕円度 $\psi \sim 10^{-6} [rad]$
 - 偏光素子の消光比 $\delta = 10^{-10}$ 。バンド幅50meV, 角度発散6 μ radと狭いが、SACLAがシード化により1eVに単色化し、かつ二段集光により角度発散を6 μ rad以下に抑えてX線も1 μ m集光できれば、偏光素子の透過率は 1.9×10^{-3}
 - Ge検出器の検出効率 = 85% @8.3878keV
- さらにレーザーON/OFF 1Hzずつでのデータ取得でよいため、動的パルス振り分けにより通常より長時間のビームタイムが得られれば（例えば2.5days*60Hz/2Hzなど）、5 σ レベルで世界で初めて真空複屈折すなわち真空の非線形性が観測できる

まとめ

- 素粒子物理学から真空の物理へ
- ヒッグス場の発見と同じく、**真空を励起することで隠された性質を探ることが可能**
 - Axion, dilaton, inflaton, dark energy, etc.
- 本研究では、回折限界まで集光したハイパワーレーザーの高強度場 ($I > 10^{22} \text{W/cm}^2$) によって真空を励起し、XFELをプローブに用い高性能なX線偏光素子によって**真空複屈折（真空の非線形効果）**を世界で初めて観測する
- これは**高強度場の物理・真空の「物性」研究の開拓**でもある。高強度場で励起された真空は様々な興味深い現象を予言する
 - Vacuum diffraction
 - Vacuum HHG, photon splitting
 - Unruh effect（加速粒子からは真空が熱浴に見える）
 - Schwinger limit（真空から電子対が飛び出す）