

マイケルソン・ツイン干渉計による光波干渉と光子干渉の同時観測

戸嶋 喜叶*・張本 鉄雄**

*山梨大学工学部 〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11

**山梨大学総合研究部工学域 〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11

Simultaneous Observation of Optical-Wave and Single-Photon Interferences with a Michelson Twin Interferometer

Kikyo TOSHIMA* and Tetsuo HARIMOTO**

*Faculty of Engineering, University of Yamanashi, 4-3-11 Takeda, Kofu, Yamanashi 400-8511

**Graduate Faculty of Interdisciplinary Research Faculty of Engineering, University of Yamanashi, 4-3-11 Takeda, Kofu, Yamanashi 400-8511

A demonstration experimental system for simultaneous observation of optical-wave and single-photon interferences is constructed based on a Michelson twin interferometer with a common optical system. By simultaneously producing two interference signals from one common interferometer, the relative variation of two interference signals in the temporal synchronization is suppressed to less than 1% of the wavelength even in the experimental environment without special temperature control and vibration-proofing equipment. Simultaneous observation of optical-wave and single-photon interferences with the proposed interferometer is possible by making one of the two interference paths correspond to the photon interference. In addition, a demonstration experiment for the quantum erasing effect is also possible in both optical-wave and photon interferences.

Key words: Michelson twin interferometer, optical-wave interference, single-photon interference

1. はじめに

光が波でも粒子でもあるという二重性をもつことは、量子力学において重要な性質のひとつであり、ある意味相反するものである。光子干渉を用いた光の二重性の演示実験は、これまでに欧米の大学で、ヤングの干渉実験やマッハ・ツェンダー干渉計を用いて行われていた¹⁻³⁾。ヤングの二重スリットによる干渉縞の観測実験では、光がスリットから広がりながら伝搬してゆき、二重スリットから離れた場所でスクリーンや光センサーなどを用いて波の重なり合いから生じる干渉縞を観測することができ、光の波動性が示される。また、スクリーンなどのかわりに光電子増倍管 (PMT) やイメージインテンシファイアーで検出するときは、光子が引き起こした光電効果で光電子が飛び出し、光子としての光を観測することができる。弱い光で実験すると、光電子はポツポツと観測される。この場合、干渉縞

は見えないが、光の粒子性は観測できる。多数の光電子を観測し積算すると、次第に干渉縞が明瞭に見えてくる。干渉縞の鮮明さは光源の可干渉性 (コヒーレンス) に依存し、コヒーレンスの高いレーザー光を用いると、干渉縞の可視度は高く、明瞭に識別できる。ヤングの干渉実験は、二重スリットを用いてレーザー光の進行方向に垂直な断面での2点を抽出することで、空間的な広がりのある波に対して、異なる場所間でも干渉することを示すものである。ヤングの実験を用いた光の二重性の観測は、レーザーの空間コヒーレンスに基づいたものでもある。

一方、同じ場所において異なる時間にレーザーを発した光同士でも干渉するという時間コヒーレンスを利用することで、レーザーの時間コヒーレンスに基づく光の波動性と粒子性の観測も可能である。時間コヒーレンスの高いレーザー光は、マイケルソン干渉計などで大きな光路差を与え

E-mail: harimoto@yamanashi.ac.jp

て干渉させた場合でも、鮮明な干渉縞を得ることができる。マイケルソン干渉計では、光線を2本のビームに分岐し、再合成したとき、もし通過した2つの光路の長さが等しく、ビーム断面の位置関係も完全に一致するならば、分岐前後のビームの時間および空間分布は完全に等しくなる。もし通過した2つの経路に光路差があると、再合成したビームの強度分布は光路差とともに余弦波形の振動をする。光路差によって分岐後の2つのビーム間に時間遅延が生じ、この時間遅延を与えたときの干渉縞の可視度を利用して、レーザーの時間的コヒーレンスが求められる。従来の単一な分岐・再合成光学系によって構成されたマイケルソン干渉計では光の波動性と粒子性を別々に観測することが可能であるが、光の二重性を同時に観測するには2つのマイケルソン干渉計が必要である。

われわれは、2つの干渉計の光学系を共有させ立体的に配置するマイケルソン・ツイン干渉計を考案し、光の時間コヒーレンスに基づく光の二重性観測を試みた。この干渉計では、古典的な光波と量子的な光子をそれぞれ干渉させてオシロスコープ画面で観測を行い、光の二重性を直感的に理解することが可能である。これまでに、2つのマイケルソン干渉計を平面上に並列配置したマイケルソン・ツイン干渉計が考案されていたが⁴⁾、立体的な配置により同一の光学系を用いた実験を可能にし、2つの干渉波形の同期性を保つことが可能である。また、2つの干渉計の同時使用を想定した実験において省スペースな装置を実現するとともに、光学系の簡略化およびユニット化に寄与する。さらに、量子的な実験の結果は光子がどの経路を通ったのかという情報に依存するため、これを体現できる光波と光子の量子消去を同時観測する実験を行うことができる⁵⁻⁶⁾。本報告では、マイケルソン・ツイン干渉計に基づく実験装置の構成、光の時間コヒーレンスに基づいた光の二重性の観測および量子消去実験の結果を述べる。

2. マイケルソン・ツイン干渉計の構成

光波および光子用経路の二系統に分離させた上で、光の波動と粒子の二重性を観測するためのマイケルソン・ツイン干渉計の実験装置を構築した (Fig. 1)。

2.1 光量調節部

出力 10 mW をもつ波長 632.8 nm の He-Ne レーザーから出射される垂直偏光ビームは、プリズムビームスプリッター (BS₁) で分束される。BS₁ の透過光は光波経路 (実線) として用い、その光量調整は経路上に設置された可変中性密度フィルター (ND) で行う。一方、BS₁ による反射光は光子経路 (点線) として用い、消光比が 1/2700 以下の偏

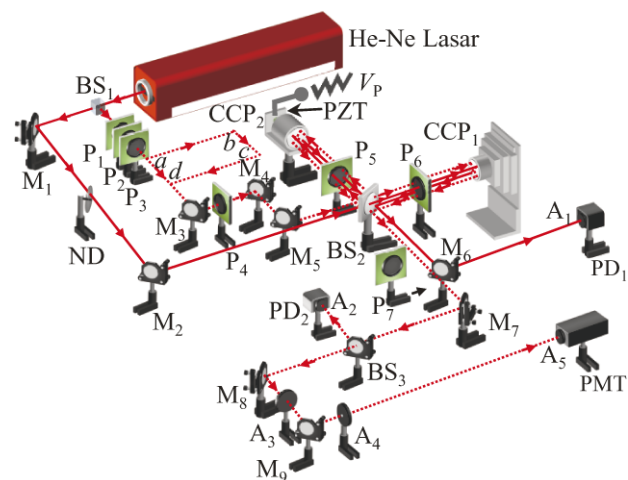


Fig. 1 Schematics of the experimental setup for observing the optical-wave and single-photon interferences. M₁-M₉, reflecting mirrors; BS₁-BS₃, beam splitters; A₁-A₅, apertures; P₁-P₇, polarizers; CCP₁, CCP₂, corner cube prisms; PD₁, PD₂, photodetectors; ND, neutral density filter; PMT, photomultiplier tube; PZT, piezoelectric transducer; V_p, applied voltage to PZT. The solid and dotted lines denote the optical-wave and photon paths, respectively. The dotted line denoted by *a*, *b*, *c*, *d* is a virtual path used to increase the photon path length if the same optical path length between the optical-wave and photon paths is necessary.

光板 (P₁, P₂, P₃) を回転し偏光方向を変化させることで、光子干渉レベルまでの光量調節を行うことが可能である。また、直後に光子経路の偏光方向を光波経路のそれと一致させるために、垂直偏光方向の偏光板 (P₄) を配置した。光波経路と光子経路を経由して干渉計に入るレーザー光は、それぞれ独立して光量調整部の反射鏡 (M₃, M₄, M₅) でアラインメントを行うことが可能である。なお、マイケルソン・ツイン干渉計の構成を簡略するため2経路に光路差が存在するが、必要に応じて Fig. 1 の点線 *a*, *b*, *c*, *d* に示すように光子経路を延長することによって、光子経路と光波経路を一致させた実験を実施できる。

2.2 干渉部

干渉部は2つのマイケルソン干渉計を立体化しており、光波経路と光子経路は光学系を共有して1つのユニットを形成している (Fig. 2)。ここで Fig. 1 と同様に、Fig. 2 中の実線は光波経路を、点線は光子経路を示す。従来のマイケルソン干渉計では平面全反射鏡がよく利用されるが、2経路に対して光学系を共用化した本実験装置においては、複数の光路を同時にアラインメントする必要から適さない。コーナーキューブプリズム (CCP₁, CCP₂) は再帰性反射する特性を有するため、アラインメントせずに入射光をすべて元きた方向に反射することが可能で、各レーザー経路を平行に配列するための調整も容易に行える。

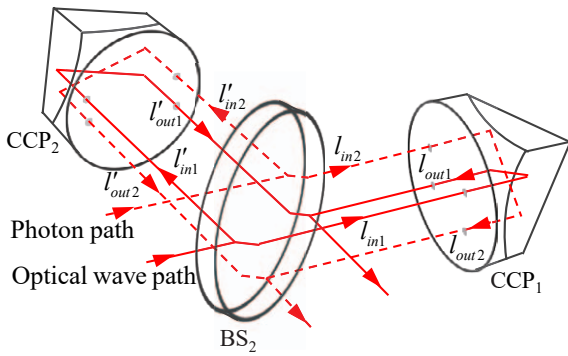


Fig. 2 Optical layout of the Michelson twin interferometer consisted of two cube-corner prisms (CCP₁, CCP₂) and a beam splitter (BS₂) for two incident laser beams along different optical paths for optical-wave and single-photon interferences, respectively.

直径 50 mm の円形ビームスプリッター (BS₂) に向かう入射光は、水平面に対して平行に経路間隔 12 mm で入射し、透過経路 l_{in1} , l_{in2} と反射経路 l'_{in1} , l'_{in2} に分かれる。このうち l_{in1} , l_{in2} を通過するレーザー光は直径 25 mm の CCP₁ に入射し、経路 l_{out1} , l_{out2} を経由して BS₂ に戻る。コーナーキューブプリズムは、光を入射させたとき中心軸に対して点対称な位置から反射するため、 $l_{in1} \rightarrow l_{out1}$, および $l_{in2} \rightarrow l_{out2}$ のように光が進み、経路がクロスし上下左右の反転が起こる。つまり、 l_{in1} , l_{in2} は上層、 l_{out1} , l_{out2} は下層をそれぞれ水平面に対して平行に通過し、上下の間隔は 7 mm で l_{in1} , l_{in2} と l_{out1} , l_{out2} のそれぞれ 4 経路が重複することなく立体構造を構築できる。一方、BS₂ の反射経路 l'_{in1} , l'_{in2} を進む光は CCP₁ と同様な CCP₂ に入射し、再帰性反射により反射経路 l'_{out1} , l'_{out2} をたどる。CCP₁ と同様に CCP₂ の入射・反射 $l'_{in1} \rightarrow l'_{out1}$ および $l'_{in2} \rightarrow l'_{out2}$ は経路にクロスが生じ、重複のない立体的な配置となり、上層 l_{in1} , l_{in2} と下層 l'_{out1} , l'_{out2} の間隔は同様に 7 mm であった。

l_{out1} , l_{out2} および l'_{out1} , l'_{out2} のレーザー光は、BS₂ を透過・反射、再び重ね合わさり、それぞれ光の干渉が生じる。また、上記のような立体構造であるため、BS₂ からレーザー共振器に光が直接逆戻りしてしまうことを防げる。光波経路 ($l_{in1} \rightarrow l_{out1}$, $l'_{in1} \rightarrow l'_{out1}$) と光子経路 ($l_{in2} \rightarrow l_{out2}$, $l'_{in2} \rightarrow l'_{out2}$) に対して、それぞれの位相シフトを $\Delta\phi_i$ 、コントラストを C_i ($0 \leq C_i \leq 1$) とすると、光波干渉信号は $1 + C_i \cos(\Delta\phi_i)$ によって示される。ここで、 i は光波経路 ($i = 1$) または光子経路 ($i = 2$) を示すものである。コーナーキューブプリズムにおける光の位相変化によって、 l_{out1} , l_{out2} および l'_{out1} , l'_{out2} の偏光は、入射時 l_{in1} , l_{in2} および l'_{in1} , l'_{in2} の直線偏光から楕円偏光に変化した。このため、干渉計内部の各腕に垂直偏光方向の直線偏光 (P_5 , P_6) を配置し、各腕の反射光の

偏光状態を揃えることで高コントラスト ($C_i \approx 1$) の干渉計測を可能にした。また、BS₂ の直後に直線偏光板を置き、 P_5 と P_6 の偏光方向を回転させることによって、量子消去実験にも対応できる。一方、PMT で検出される光子数分布はヒストグラムになり、光子数が増えていくと光子検出数のヒストグラムに光波干渉のような干渉縞が現れる。また、CCP₂ に取り付けた圧電素子 (PZT) に印加する鋸型電圧 (V_p) の駆動により 48 nm/V の割合で $l'_{in1} \rightarrow l'_{out1}$, $l'_{in2} \rightarrow l'_{out2}$ の経路長の変位を起し、干渉結果の時間に対する依存性の観測を行う。

2.3 検出部

光波干渉と光子干渉の検出にはそれぞれ光検出器 (PD₁) と PMT を使い、オシロスコープでそれらの干渉結果の時間変化の観測を行う。また、ビームスプリッター (BS₃) で光子経路のレーザー光の一部を反射させ、光波経路および光子経路の同期性を光検出器 (PD₂) で確認する。散乱光の影響を防ぐため、PD₁ と PD₂ にはそれぞれ可変アパチャー A_1 と A_2 を取り付ける。

PMT は微弱な光に敏感であるため、光子干渉の測定を実施するにあたり散乱光などの低減に努める必要がある。実験では、He-Ne レーザー、マイケルソン・ツイン干渉計および PMT にカバーを設けた。さらに直径 1 mm のアパチャー (A_3 , A_4 , A_5) を光子経路上に設置すると同時に、レーザー光を覆うように円形チューブ式のカバーを施し、PMT と一体化させた。

3. 実験結果

3.1 光の二重性の観測結果

光子経路の光子量を一定に保つ条件で干渉結果の計測の持続時間に対する依存性を確認した。光量調節用偏光板 (P_1 , P_2 , P_3) はすべて水平偏光状態に設定し、オシロスコープのパーシストタイムの機能を用いて計測の持続時間を変化させ、検出器 (PD₁, PMT) からの信号を観測した。計測の持続時間 50 ms の場合の Fig. 3 (a) において、(i) では周期的な干渉縞が現れ波動性を示しているが、光子経路の検出信号 (ii) はランダムなパルス信号として表れ、おのおのが光の粒子性としての性質を示す。このことから、マイケルソン・ツイン干渉計を用いて、単一レーザー光源を用いた光の波動性と粒子性を同時に示すことが可能である。また、ノイズ光対策は大部分の散乱光を防ぐ効果があると考えられ、光子に相当するパルス信号がはっきりと見て取れる。Fig. 3 (b) に示すように、計測の持続時間を 5 min まで延ばすと、光子経路の検出信号 (ii) は周期的な山と谷がはっきりとした干渉縞を発生し、光波経

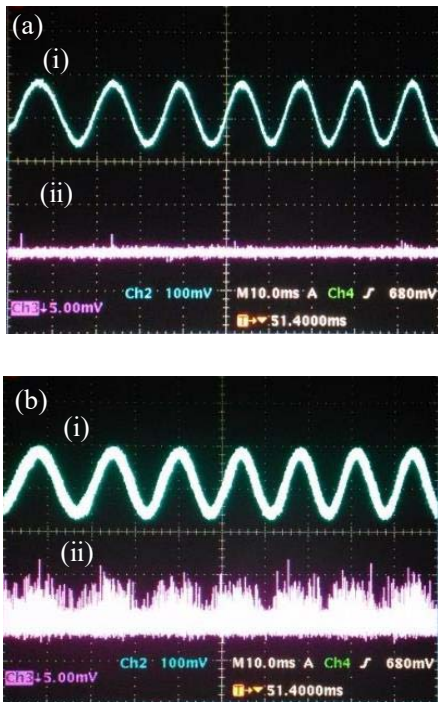


Fig. 3 Photographs displayed on an oscilloscope of the temporal dependence of optical-wave (labeled as i) and single-photon (labeled as ii) interferences for persistence times of (a) 50 ms and (b) 5 minutes, respectively. P_1 , P_2 , and P_3 are in the same polarization direction normal to the laser polarization.

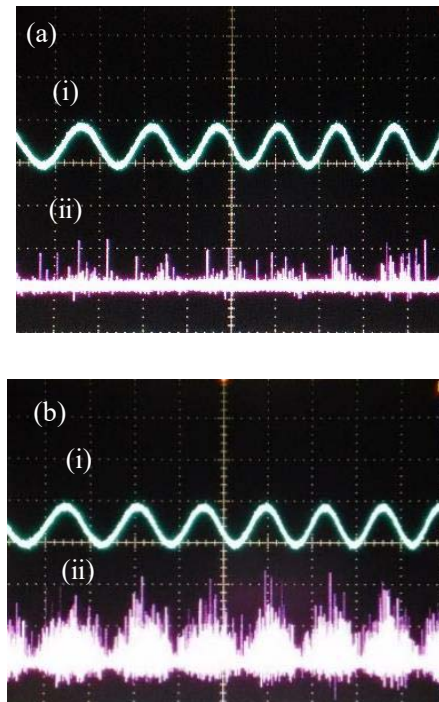


Fig. 4 Photographs displayed on an oscilloscope of the temporal dependence of optical-wave (labeled as i) and single-photon (labeled as ii) interferences by respectively changing the polarization direction of P_1 at 2.5 [Fig. 4 (a)] and 10 [Fig. 4 (b)] degrees from the horizontal direction.

路と同形の波形となり光子干渉が観測できる。また、(ii)の山の高さには違いがみられるが、検出時間をより長時間にすることで $1 + C_2 \cos(\Delta\phi_2)$ に近似していくと考えられる。これより、マイケルソン・ツイン干渉計を使用して、光子干渉を用いた光の二重性の観測が可能であると示された。

次に、偏光板 P_1 , P_2 , P_3 の偏光方向をすべて水平方向にした状態を基準角度とし、測定の実験時間を一定に保つ条件で干渉結果の光量に対する依存性を確認した。Fig. 4 (a) に、3枚の偏光板のうち1枚 (P_1) を基準角度から 2.5° 回転させたときのオシロスコープ画像を示す。偏光板の回転に伴って (ii) の光子数が増加しているため、PMTで検出されるパルス信号の数が増加していることがわかる。基準角度から 10° まで偏光板を回転させた結果 (Fig. 4 (b)) から、 2.5° の状態に比べて (ii) の光子数が増加することにより、山と谷が認識可能かつはっきりとした干渉縞が観察できる。実験においては、回転角 (光子数) を増やしていくに従って PMT で検出される信号波形が滑らかな曲線状になり、光波干渉の波形に近づいていくことが確認された。つまり、一定時間において光子数が少ない非常に弱い光の状態では粒子性を示すが、光子数が多い強い光であれば波動性を示すと理解できる。

3.2 マイケルソン・ツイン干渉計の時間同期性

マイケルソン・ツイン干渉計から得られた2つの干渉信号は同一の光学系を使用したため同じような二光波干渉分布になるが、2つの干渉信号間における時間的な同期性 (位相差 $\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2$) の環境温度や振動などに対する依存性を確認する必要がある。干渉波形の位相シフト $\Delta\phi_1$ と $\Delta\phi_2$ は、それぞれ実験温度などの実験室環境の影響によって変化するが、位相差 $\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2$ 干渉波形の時間的な相対位置はわずかな変化にとどまっていた。室温 25°C において10分間のシフト量を計測した結果、 $\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2$ の変化にはばらつきがあるものの、換算すると最大 1.2×10^{-2} 波長程度であると確認できた。このことから、マイケルソン・ツイン干渉計が有する2経路について、位相シフトの時間的な同期性を持ち合わせていると考えられる。この性質を利用すると、片方の経路に光電効果性質をもつ結晶を挿入することで、光電効果による位相変化を利用し位相シフト量の算出ができると予想され、材料表面の粗さの計測に利用することも考えられる。また、実験では位相差 $\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2$ を P_5 と P_6 の傾きや CCP_1 と CCP_2 に入射する光位置の微調整を行うことにより、意図的に変化させることもできる。

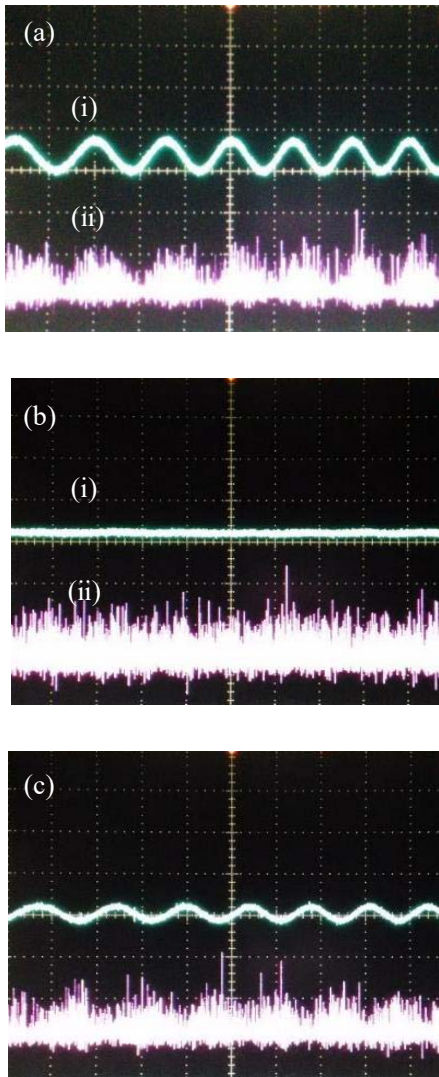


Fig. 5 Experimental demonstration for the quantum erasing with optical wave (i) and single photon (ii) interferences. Photograph (a) displays the optical-wave and single-photon interferences when P_5 and P_6 are positioned in the vertical. Photograph (b) shows the quantum erasing for P_5 and P_6 oppositely rotated to 45 degree from the vertical direction. Photograph (c) is the interference reappearance by inserting P_7 between BS_2 and M_6 .

3.3 量子消去実験

量子消去実験は、量子力学の原理である重ね合わせ状態を演示するものである。Fig. 1の実験配置に示す干渉計における光子の状態を量子力学の観点から解釈すると、光子は干渉計の中で通過経路に対応する2つの異なった状態を

もつことになり、波動関数の重ね合わせによって干渉が生じる。量子力学の不確定性原理では、光子がもっている2つの情報のうちの1つを明らかにすると、もう1つの情報を正しく知ることができなくなり、波動関数の重ね合わせも不可能となるため、干渉縞は生じない。しかし、光子の経路情報を消去すると、重ね合わせ状態を保つことが可能になり、干渉縞を復活することができる。Fig. 1に示す実験配置で量子消去実験を行うためには、マイケルソン干渉計の2つの腕のうちどちらの腕を光子が通過したかという情報を付加する必要がある。マイケルソン干渉計の各腕に1枚ずつ配置されている偏光板(消去板) P_5 と P_6 の偏光方向を垂直方向に設定すると、光子がどちらの腕を通過したかは判明できないため、干渉縞を観測することができる(Fig. 5 (a))。一方、PMTへ入射する光子に対して直交する偏光情報を付加するように、 P_5 および P_6 を垂直方向からそれぞれ45°ずつ回転させると、2つの腕のどちらを通過したかが判別可能になり、この状態でPMTの検出信号を確認すると干渉縞が消えた(Fig. 5 (b))。この後、ビームスプリッター BS_2 と反射鏡 M_6 の間に垂直偏光または水平偏光の偏光板 P_7 を挿入すると、どちらの腕を光子が通過したかという情報が消去されるため、干渉縞の復活が確認できた(Fig. 5 (c))。

4. ま と め

マイケルソン・ツイン干渉計装置を考案し、光の波動性と粒子性の同時観察の演示実験装置を構築した。測定時間を変化させ光子数を一定に保つ条件と、測定時間は一定で光子数を増加させる条件のいずれの場合も、光が粒子性から波動性に移行していくことが確認された。また、この干渉計で量子消去の演示実験を行うことも可能であり、光学材料の表面粗さの計測への研究応用も考えられる。

文 献

- 1) T. L. Dimitrova and A. Weis: Phys. Scr., **T135** (2009) 014003.
- 2) E. J. Galvez, C. H. Holbrow, M. J. Pysher, J. W. Martin, N. Courtemanche, L. Heilig and J. Spencer: Am. J. Phys., **73** (2005) 127-140.
- 3) W. Ruecknera and J. Peidle: Am. J. Phys., **81** (2013) 951-958.
- 4) S. W. P. v. Sterkenburg, Th. Kwaaitaal and W. M. M. van den Eijnden: Rev. Sci. Instrum., **61** (1990) 2318-2322.
- 5) T. L. Dimitrova and A. Weis: Eur. J. Phys., **31** (2010) 625.
- 6) R. Hillmer and P. Kwiat: Sci. Am., **296** (2007) 90-95.