

REJESTROWANIE

Żądza poznania natury szybkich zjawisk napędza postęp technologiczny od lat. Także w dziedzinie ultraszybkiej fotografii.

dr Łukasz Piątkowski

Instytut Chemii Fizycznej, Polska Akademia Nauk, Warszawa

Dziś, w erze fotografii cyfrowej, ludzie robią codziennie dziesiątki zdjęć, czasami nie zdając sobie nawet z tego sprawy. Kiedy zauważą coś, co im się podoba, wyciągają telefon z kieszeni – pstryk – i gotowe. Mogą natychmiast sprawdzić klatkę i powtórzyć ją, jeśli potrzeba. Większość smartfonów oraz aparatów cyfrowych ma wiele zdefiniowanych ustawień, które sprawiają, że słabe warunki oświetlenia, intensywne światło słońca bądź szybko poruszające się obiekty nie wpływają na jakość zdjęć. Fotografia stała się na tyle prosta, że nawet kompletny laik jest w stanie uwiecznić swoim telefonem zjawiska, których fotografowanie jeszcze kilkadziesiąt lat temu było w sferze marzeń.

W ostatnich kilkadziesięciu latach nastąpił ogromny postęp technologiczny, który pozwala na robienie zdjęć z ultrawysoką czułością oraz jakością. Również uwiecznianie szybko poruszających się obiektów lub błyskawicznie przebiegających zjawisk nie stanowi już wielkiego wyzwania. Ostrość zdjęcia jest definiowana głównie przez czas naświetlenia elementu światłoczułego kamery. Czas ten jest kontrolowany przez prędkość otwierania się i zamykania migawki. Komercyjnie dostępne wysokiej klasy aparaty fotograficzne mają migawki, których czas otwarcia sięga 1/8000 sekundy, tak więc element czuły aparatu jest naświetlany przez jedynie 0,125 milisekundy. W rezultacie uwiecznienie na zdjęciu przelatującego pocisku, pękającego balonu czy szklanej lampki do wina jest w zasięgu nawet niedoświadczonych fotografów.

Galop do wybuchu

Ludzie od zawsze byli ciekawi procesów, których szczegóły umykają ludzkiemu oku. Historia szybkiej fotografii sięga XIX w., czasu pionierskich prac wykonanych przez Eadwarda Muybridge'a, brytyjskiego fotografa pracującego głównie

DR ŁUKASZ PIĄTKOWSKI

NIEWIDZIALNEGO



Fotografia przedstawiająca eksplodujący balon wypełniony wodą. Do wykonania zdjęcia użyto standardowego aparatu cyfrowego (lustrzanki) oraz pojedynczego impulsu światła laserowego o czasie trwania 50 femtosekund do oświetlenia balonu.



Dr Łukasz Piątkowski

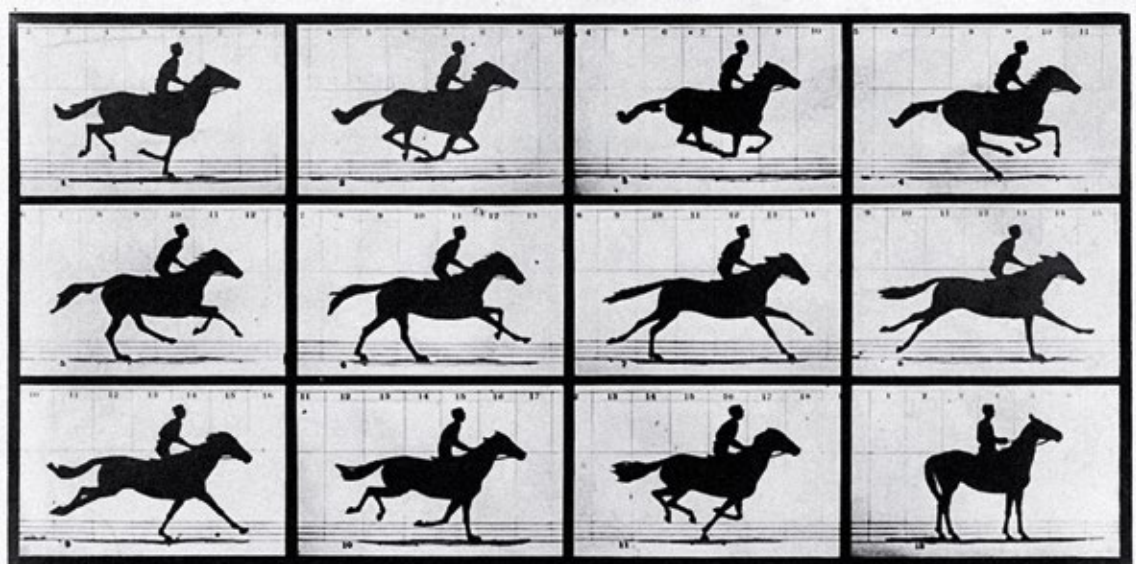
jest fizykiem, adiunktem w Zakładzie Fotochemii i Spektroskopii IChF PAN. Tytuł doktora uzyskał na Uniwersytecie w Amsterdamie w 2012 r. Odbył 4-letni staż podoktorski w Instytucie Nauk Fotonicznych (ICFO) w Barcelonie. Zajmuje się szeroko pojętą ultraszybką spektroskopią oraz mikroskopią. lpiatkowski@ichf.edu.pl

w San Francisco. W 1872 r. Muybridge otrzymał zadanie wykonania serii zdjęć galopującego konia, by udzielił odpowiedzi na pytanie, czy w jakimkolwiek momencie swojego biegu wszystkie jego cztery kończyny są jednocześnie uniesione w powietrzu. Celem tego zadania było zatem uwiecznienie na zdjęciu wydarzenia, którego nie sposób dostrzec gołym okiem. Jak głosi historia, zadanie to było przedmiotem zakładu o wartości 25 tys. dolarów pomiędzy dwoma lokalnymi biznesmenami, którzy hazard mieli we krwi. Ich cierpliwość została wystawiona na poważną próbę – czekali 6 lat, do 1878 r., kiedy to możliwości techniczne pozwoliły wreszcie Muybridge'owi wykonać serię zdjęć z czasem migawki około 1 milisekundy i pokazać, że rzeczywiście podczas galopu koń jednocześnie unosi swoje cztery kończyny ponad powierzchnię ziemi. Ten projekt uważany jest za kamień węgielny ultraszybkiej fotografii.

Jak uczy historia, rozwój technologiczny jest niezwykle intensywny zwłaszcza w czasie wojny. Nie inaczej było w latach 1939–1945. Wtedy też nastąpił ważny etap rozwojowy w ultraszybkiej fotografii. Na początku lat 40. specjalizujący się w inżynierii elektrycznej Harold Eugene Edgerton został wraz ze współpracownikami zaangażowany przez rząd Stanów Zjednoczonych do sfotografowania oraz sfilmowania testów nuklearnych. Celem było pokazanie wybuchu ładunku atomowego w czasie poniżej milisekundy od detonacji, aby lepiej zrozumieć związane z nim procesy fizyczne. Do realizacji projektu inżynierowie zaprojektowali kamerę zwaną Rapatronic, która zdolna była uzyskać obraz z nanosekundowym czasem ekspozycji, czyli 10^{-9} sekundy. Zamiast użycia mechanicznej migawki na

wzór aparatu używanego przez Muybridge'a, działanie kamery Edgertona oparte było na polaryzacyjnych właściwościach światła. Umieścił on tak zwaną komórkę Faradaya pomiędzy dwoma filtrami polaryzacyjnymi ustawionymi ortogonalnie (pod kątem 90 stopni) względem siebie. Takie ustawienie filtrów powoduje zablokowanie światła padającego na nie. Jednak przyłożenie krótkiego impulsu elektrycznego do komórki Faradaya powoduje, że światło przechodzące przez komórkę zmienia polaryzację, przedostaje się przez drugi filtr i dociera do detektora. Użycie kamery Rapatronic pozwoliło Edgertonowi i jego kolegom zrobienie zapierających dech w piersiach zdjęć eksplozji nuklearnych w trakcie testów w latach 40. i 50.

Edgerton był pionierem użycia ultrakrótkich błysków światła do fotografowania szybkich wydarzeń. Poświęcił niemal całe swoje życie na udoskonalanie tak zwanych lamp stroboskopowych (wyładowczych) oraz użycie ich światła do celów fotograficznych. Zyskał przy tym przydomek Papa Flash (Tata Błysk). Prace Edgertona rozpowszechniły użycie lamp wyładowczych, mogących generować błyski światła o czasie trwania poniżej mikrosekundy. Błysk światła w takich lampach generowany jest poprzez wyładowanie elektryczne pomiędzy dwiema elektrodami, zachodzące w obecności wysokiego napięcia (typowo kilka kilowoltów). Lamy wyładowcze generujące submikrosekundowe błyski są szeroko dostępne i stosowane w fotografii do dziś. Generują impulsy świetlne wystarczająco krótkie, aby robić zdjęcia pociskom w locie bez zauważalnego rozmycia. Na przestrzeni lat Edgerton używał lamp stroboskopowych również do robienia zdjęć eksplodujących balonów w różnych



Copyright, 1878, by MUYBRIDGE.

MORSE'S Gallery, 417 Montgomery St., San Francisco.

THE HORSE IN MOTION.

Illustrated by MUYBRIDGE.

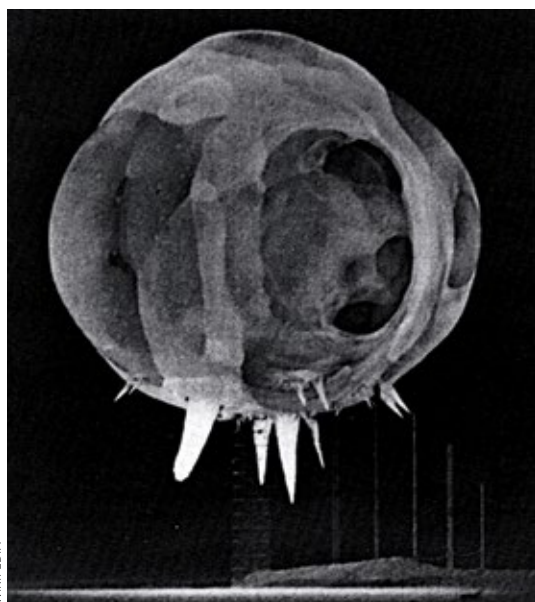
BY SYDNEY, ELECTROPHOTOGRAPH.

"SALLIE GARDNER," owned by LELAND STANFORD; running at a 1.40 gait over the Palo Alto track, 19th June, 1878.

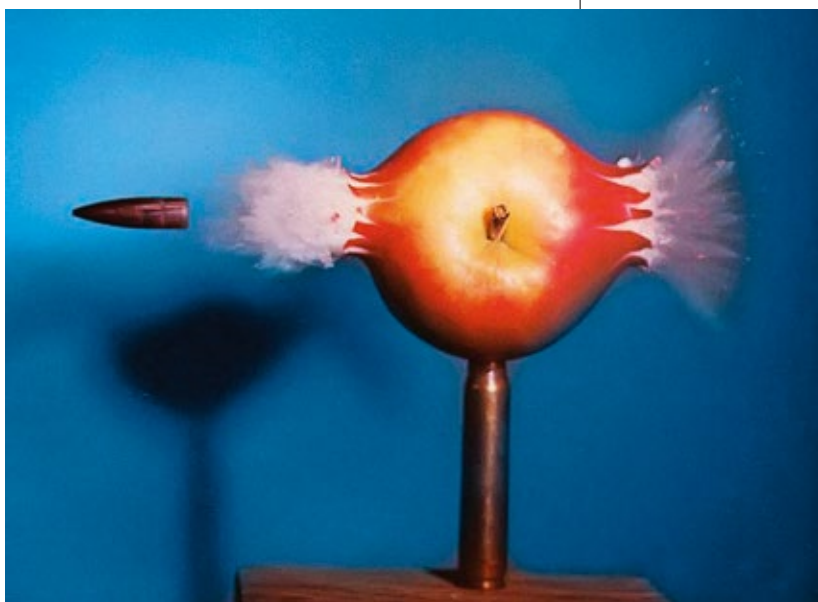
The exposure of these photographs was made at intervals of twenty-one millionths of a second, and during the twenty 8th part of a second of time, they illustrate consecutive positions assumed as the creature passes the line of projection during a single stride of the mare. The vertical lines were to compare better apart; the horizontal lines represent divisions of one inch each. The exposure of each negative is less than the two-thirtieths part of a second.

Praca pod tytułem „Koń w ruchu” – seria zdjęć wykonanych przez Eadwearda Muybridge'a w 1878 r. ukazująca kolejne fazy ruchu galopującego konia.

DR ŁUKASZ PIĄTKOWSKI



WIKIPEDIA



stanach rozerwania, pocisków uderzających w różne cele, spadających kropli mleka, eksplodujących naczyń szklanych i wielu innych szybkich wydarzeń.

I tutaj nasuwa się pytanie – czy da się fotografować zjawiska jeszcze szybsze, a więc wykonywać zdjęcia z jeszcze krótszym czasem ekspozycji?

Woda do uwolnienia

Przez ostatnich 10 lat moje badania naukowe przeplatały się z ultraszybką fotografią, której główną ideą jest uchwycenie tego, co niedostrzegalne gołym okiem. Ten sam koncept jest podstawą czasowo-rozdzielczej spektroskopii i mikroskopii. W trakcie doktoratu badałem m.in., w jaki sposób zachowują się cząsteczki wody (jak się przemieszczają, obracają, jak tworzą się i zrywają wiązania wodorowe) w układach o znaczeniu biologicznym, jak szybko poruszają się ładunki w pojedynczej warstwie grafenu i w jakim tempie wysokoenergetyczne ładunki relaksują w półprzewodnikowych kropkach kwantowych. Te eksperymenty łączy jeden bardzo ważny fakt – ich celem jest zrozumienie natury szybkich procesów zachodzących w tych układach. Większość czasowo-rozdzielczych eksperymentów, czy to przeprowadzonych w makro-, mikro-, czy nanoskali, składa się z dwóch etapów. W pierwszym system wyprowadzany jest ze stanu równowagi za pomocą zewnętrznego bodźca. W drugim jakiś rodzaj sondy oddziałuje z układem w celu „odczytu” jego aktualnego stanu. Ze względu na to, że dynamika cząsteczek wody oraz ładunków zachodzi zazwyczaj w czasach femto- do nanosekund, zarówno zewnętrzny bodziec, jak i sonda najczęściej przyjmują formę krótkich (piko- albo femtosekundowych) impulsów laserowych. Pierwszy wprowadza system w stan wzbudzony (oscylacyjny, rotacyjny bądź elek-

tronowy), podczas gdy drugi (znacznie słabszy) monitoruje stan układu. W rzeczywistym eksperymencie czas, po którym drugi impuls oddziałuje z próbką, jest zmieniany, tak aby sonda raportowała o stanie układu w różnym czasie od wzbudzenia. Pozwala to na monitorowane ewolucji układu, a co za tym idzie – uzyskanie dokładnych danych na temat dynamiki układu.

W celu rozpowszechnienia i przybliżenia szerokiej publiczności ultraszybkiej spektroskopii laserowej, na zwieńczenie swojego doktoratu wykonałem serię ultraszybkich zdjęć, które odzwierciedlają kwintesencję ultraszybkiej spektroskopii i mikroskopii. W owym czasie pracowałem nad dynamiką oraz oddziaływaniem pomiędzy cząsteczkami wody, dlatego jako temat zdjęć wybrałem eksplodujący wypełniony nią balon. Chciałem uwidocznic na fotografii moment tuż po pęknięciu, kiedy to rozerwany balon nie otacza już zawartej w nim wody, ale ona nadal ma kształt balonu. Co ważniejsze, w celu scementowania nauki z fotografią, do zrobienia tych zdjęć wykorzystałem jako błyski pojedyncze impulsy laserowe. W przeciwieństwie do standardowej fotografii wyładowczej, gdzie błyski światła trwają ok. 1/1000 sekundy, w moich fotografiach użyłem impulsu trwającego jedynie 50 femtosekund (ponad milion milionów czas krótszy od sekundy). Sposób zrobienia tych zdjęć był analogiczny do prowadzonych przeze mnie ultraszybkich eksperymentów spektroskopowych. Najpierw elektronicznie kontrolowana igła przekłuła balon (wytrąciła układ ze stanu równowagi), a następnie ultrakrótki błysk światła oświetlił układ (wyjawił stan układu w danej chwili), podczas gdy element czuły kamery zarejestrował obraz.

Uzyskane ultraszybkie fotografie w piękny sposób odzwierciedlają wszechobecne oddziaływania pomiędzy światłem a materią i obrazują w artystyczny

Z lewej:
wybuch nuklearny uwieczniony po czasie ok. 1 milisekundy od detonacji. Zdjęcie wykonano kamerą Rapatronic w 1952 r. Kula ognia ma ok. 20 m średnicy.
Z prawej:
zdjęcie obrazujące moment krótko po przelocie pocisku przez jabłko (Harold Edgerton Archive, MIT). Zdjęcie wykonano w 1964 r.

Fotografia wykonana przy użyciu pojedynczego impulsu światła laserowego o czasie trwania 50 femtosekund do oświetlenia sceny.



ŁUKASZ PIĄTKOWSKI/YVES REZUS

sposób oddziaływania pomiędzy cząsteczkami wody oraz ich dynamikę. Posiadając raczej estetyczne i artystyczne walory aniżeli wartość naukowo-poznawczą, fotografie te udekorowały okładkę mojej rozprawy doktorskiej; zostały przedstawione w kilku artykułach popularno naukowych w Holandii oraz Hiszpanii, a także w kalendarzu wydanym przez Katalońskie Stowarzyszenie Fizyczne (Hiszpania), upamiętniającym Międzynarodowy Rok Światła 2015.

Światło do podejrzenia

Różne zjawiska oraz procesy niedostrzegalne gołym okiem zachodzą zarówno w królestwie roślin, jak i zwierząt, a także są dziełem człowieka. Jednakże, jak na ironię, w makroskopowym świecie nie ma wydarzeń, które wymagałyby użycia tak krótkich (femtosekundowych) błysków światła w fotografii! Dla przykładu koliber macha skrzydłami z częstotliwością około 50 uderzeń na sekundę. Grzyb *Pilobolus crystallinus* (zwany również Hat Thrower) jest zdolny wystrzeliwać swoje zarodniki z prędkością ok. 25 m/s. Zatem, aby uwiecznić na zdjęciu te zjawiska, wystarczy migawka o czasie otwarcia około 10 mikrosekund. Jedną z najszybszych dostępnych strzelb używanych przez człowieka (0,220 Swift) wystrzeliwuje pociski z prędkością około 1200 m/s. Używając migawki o czasie

otwarcia 0,1 mikrosekundy można bez problemu zrobić ostre zdjęcie takiego pocisku w locie.

Nie tylko małe obiekty mogą poruszać się z ogromnymi prędkościami. Międzynarodowa stacja kosmiczna orbituje wokół Ziemi z prędkością przelotową 7660 m/s. Jednakże nawet dla tego obiektu kosmicznego podobny czas otwarcia migawki, bliski mikrosekundy, wystarczy, aby zrobić ostre zdjęcie z odległości kilkudziesięciu metrów. Światło samo w sobie jest uważane za najszybszą rzecz we Wszechświecie. Co ciekawe, światło, poruszając się z prędkością bliską 300 mln m/s, przebywa „jedyń” 0,3 metra w czasie 1 nanosekundy (stąd 0,3 mm w czasie 1 pikosekundy bądź 0,3 mikrometra w czasie 1 femtosekundy). Tak więc w czasie 50 femtosekund, kiedy zastosowany przeze mnie błysk światła oświetlił eksplodujący balon, światło przebyło jedynie 15 mikrometrów.

Ultraszybkie zjawiska są niezwykle fascynujące. Ludzie często nie zdają sobie sprawy z ich istnienia, jednakże ich życie bazuje na reakcjach chemicznych, z których wiele zachodzi w czasach niezmiernie krótkich. Jestem przekonany, że dzięki nieprzerwanemu postępowi naukowemu i technologicznemu przyszłość będzie usłana nowymi odkryciami w sferze ultraszybkich zjawisk.

ŁUKASZ PIĄTKOWSKI

Chcesz wiedzieć więcej?

Piątkowski Ł., Rozprawa doktorska (2012), <https://amolf.nl/publications/water-interacting-with-interfaces-ions-and-itself>

Wszystko o Haroldzie Edgertonie i jego pracy, <http://edgerton-digital-collections.org>

Informacje o Eadweardzie Muybridge'u i jego pracach, <http://www.eadweardmuybridge.co.uk>

Gao L. i inni (2014), Single-shot compressed ultrafast photography at one hundred billion frames per second. *Nature*, 516 (7529): 74