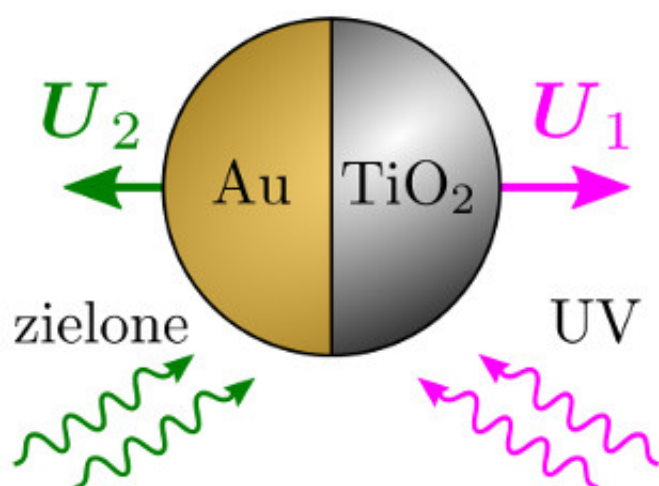


Aktywne mikrocząstki z oddziaływaniami sterowanymi zewnętrznym oświetleniem

2020-06-03

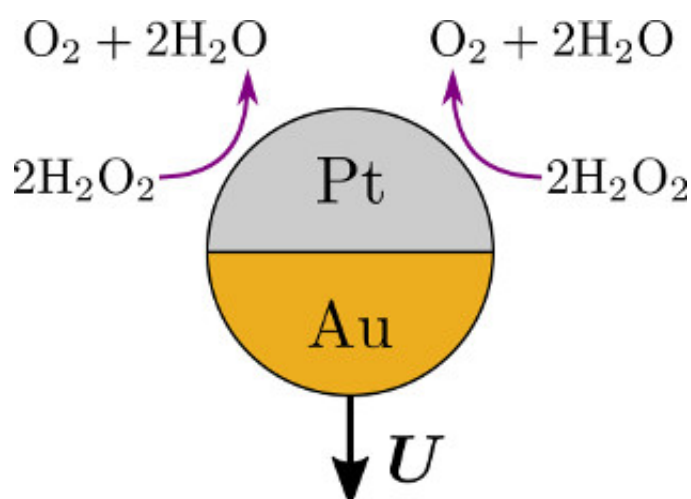
Badacze z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, ETH w Zurychu i Uniwersytetu w Cambridge zademonstrowali aktywne mikrocząstki, poruszające się w płynie pod wpływem zewnętrznego oświetlenia, których kierunek ruchu zależy od długości fali padającego światła. Wyniki badań opublikowano w prestiżowym czasopiśmie naukowym Nature Communications.



Schemat nowego mechanizmu katalitycznego. Cząstka zbudowana z dwutlenku tytanu o jednej półkuli pokrytej złotem porusza się pod wpływem zewnętrznego oświetlenia. Kierunek jej ruchu zależy jednak od długości fali. Pod wpływem oświetlenia światłem zielonym cząstka porusza się w kierunku wyznaczonym przez złotą półkulę, zaś oświetlona światłem UV porusza się w kierunku przeciwnym. (Źródło: Wydział Fizyki UW, M. Lisicki)

Materia aktywna to układy, których elementy mogą samoistnie poruszać się, czerpiąc energię ze swojego otoczenia i przekształcając ją w energię kinetyczną. Badania nad nimi są obecnie bardzo dynamiczną dziedziną fizyki. Obejmują one wiele skal czasowych i przestrzennych, m.in. zachowania ptaków w stadach (np. szpaków tworzących na wieczornym niebie dynamicznie ewoluujące wzory), ryb w ławicach (jako forma ochrony przed drapieżnikami), ale również bakterii w biofilmach i innych pływających mikroorganizmów w środowisku wodnym. Przedmiotem tej dziedziny są zarówno badania indywidualnych elementów składowych i zrozumienie mechanizmów konwersji energii, szczegółów oddziaływania i sprzężenia z otoczeniem, tak ważnych np. dla przeżycia mikroorganizmów, jak również prace nad efektami kolektywnymi i emergencją nowych zjawisk w dużych populacjach. Jedne i drugie mogą być z powodzeniem opisywane na różnych poziomach dokładności, począwszy od minimalistycznych modeli gruboziarnistych, a skończywszy na wyrafinowanych symulacjach numerycznych.

Bakterie, algi, plemniki, orzęski i inne jednokomórkowe organizmy stanowią ważną grupę tzw. aktywnych pływaków. Zrozumienie fizycznych podstaw ich dynamiki jest często trudne ze względu na różnorodność, złożoność biologiczną i dużą wrażliwość na warunki otoczenia. Wodny mikroświat rządzi się jednak uniwersalnymi prawami fizyki cieczy, które nakładają ograniczenia na wszystkie organizmy. Ze względu na małe rozmiary – rzędu mikrometrów – i prędkości nie przekraczające typowo kilkudziesięciu rozmiarów komórki na sekundę, przepływ płynu wokół nich jest zdominowany przez efekty lepkościowe. Oznacza to, że strategie pływania, które sprawdzają się dla rekinów czy pływaków olimpijskich, kompletnie zawodzą dla mikroskopijnych zawodników. Pływanie w skali makro opiera się bowiem na efektach bezwładności i poruszaniu się przez gwałtowny odrzut wody w przeciwnym kierunku. W mikroskali efekty te są pomijalne, a woda zachowuje się jak bardzo lepki płyn, np. miód. Spróbujmy wyobrazić sobie pływanie kraulem w basenie pełnym miodu – spodziewamy się, że będzie to bardzo wycieńczające i mało efektywne. Dlatego mikroorganizmy wykształciły inne strategie pływania, oparte na wykorzystaniu lepkości. Bakterie mają często helikalne wici, którymi ‘wkręcają’ się w płyn niczym korkociągi. Okazuje się, że w lepkiem świecie strategia ta pozwala na efektywne poruszanie się komórek. Większe mikroorganizmy, takie jak orzęski (wśród nich znany powszechnie ze szkolnej biologii pantofelek), pokryte są tysiącami krótkich rzęsek. Poruszają one nimi w skoordynowany sposób, przypominający meksykańską falę na stadionie. Mechanizm ten pozwala na transport płynu wzdłuż powierzchni komórki, a w efekcie na ruch komórki w przeciwną stronę do kierunku fal rzęsek na powierzchni.



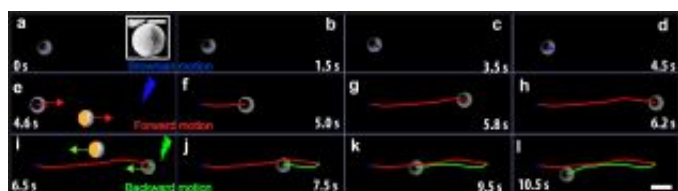
Cząstka Janusa o "dwóch twarzach". Klasyczna realizacja to półkule ze złota i platyny umieszczone w roztworze wody utlenionej (H_2O_2). Platyna katalizuje rozkład wody utlenionej do wody i tlenu, powodując zwiększone stężenie produktów reakcji w stosunku do stężeń po stronie pokrytej złotem. Powoduje to powstanie przepływu wokół cząstki, a w efekcie cząstka zaczyna poruszać się z prędkością U w kierunku wyznaczonym przez jej oś symetrii. (Źródło: Wydział Fizyki UW, M. Lisicki)

Zrozumienie tych mechanizmów zainspirowało rozwój syntetycznych mikropływaków. Perspektywa wytwarzania mikrorobotów w laboratorium od dziesięcioleci rozbudza wyobraźnię badaczy ze względu na możliwe zastosowania diagnostyczne, medyczne i przemysłowe, takie jak np. precyzyjny transport leków w ciele pacjenta. Z tego punktu widzenia szczególnie ważna jest nie tylko możliwość produkcji takich pływaków, ale również kontrola kierunku ich ruchu.

Opisany powyżej mechanizm transportu płynu przez orzęski (stosowany również w organizmach wielokomórkowych, np. ludzkich – przez rzęski w płucach albo w drogach rodnych do transportu śluzu), zainspirowało opracowanie całej gamy pływaków opartych na zjawisku dyfuzjoforezy. Wyjaśnimy je na przykładzie doświadczenia z tzw. cząstką Janusa (nazwa nawiązuje do rzymskiego boga o dwóch twarzach) – mikroskopijną kulą o jednej półkuli pokrytej złotem, a drugiej pokrytej platyną. Po umieszczeniu jej w roztworze wody utlenionej (H_2O_2), platyna katalizuje rozkład płynu do wody i tlenu.

W efekcie stężenie produktów reakcji po stronie platynowej półkuli jest większe, a zatem pojawia się przepływ płynu wzdłuż powierzchni, zmierzający do wyrównania stężeń. Podobnie jak w przypadku mikroorganizmów, przepływ względem powierzchni wywołuje ruch samej cząstki w przeciwnym kierunku. Mamy zatem do czynienia z układem, który lokalnie przekształca energię chemiczną otoczenia w energię kinetyczną swojego ruchu. Mechanizm opisany powyżej jest uniwersalny – niezbędnym składnikiem jest niejednorodne stężenie produktów reakcji chemicznej na powierzchni. Co więcej, możemy zastąpić go np. niejednorodnym rozkładem temperatury albo rozkładem potencjału elektrostatycznego. Wszystkie te mechanizmy zostały doświadczalnie potwierdzone w układach mikroskopowych. Warto podkreślić, że rozmiary i prędkości takich pływaków są porównywalne z układami biologicznymi, które je inspirowały. A zatem, poprzez badania sztucznej materii aktywnej, zyskujemy dodatkowe okno, przez które możemy zajrzeć do płynącego mikroświata.

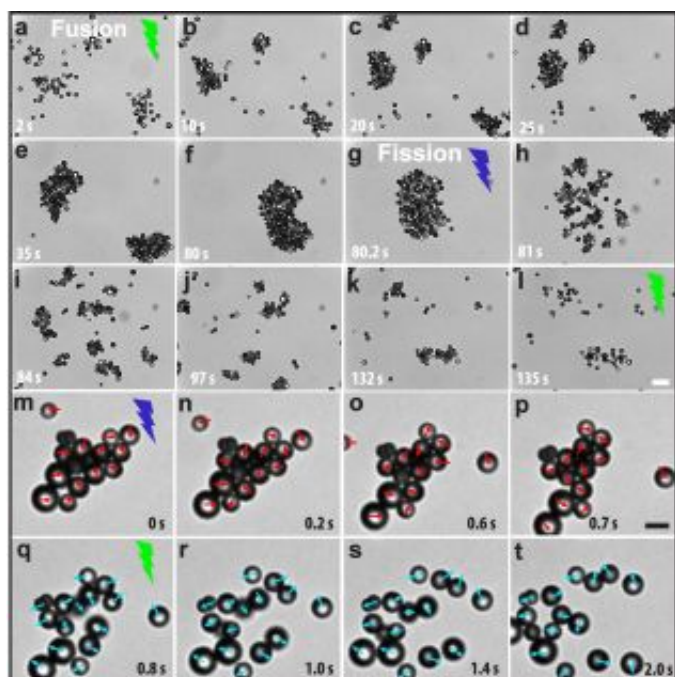
W toku rozwoju badań syntetycznej materii aktywnej zaproponowano wiele lokalnych mechanizmów napędowych. Wyzwaniem pozostaje jednak kontrola ruchu pływaka, pozwalająca "zaprogramować" go tak, by dotarł w określone miejsce i np. dostarczył lek do wybranej części ciała pacjenta. Alternatywnie mógłby on być sterowany przez zewnętrznego operatora przy pomocy określonych bodźców. Bodźcem takim może być np. promieniowanie elektromagnetyczne, pole magnetyczne, elektryczne, nierównomierny rozkład temperatur albo sygnał akustyczny.



Podwójny katalityczny mechanizm napędowy cząstek Janusa nowego typu. Cząstki składają się z anatazu (mineralnej formy dwutlenku tytanu) i mają jedną (jaśniejszą) półkulę pokrytą złotem – jak widać na obrazie z mikroskopu elektronowego w lewym górnym rogu. Obraz mikroskopowy zawiera klatki z filmu, na którym początkowo (a-d) cząstka wykonuje swobodne ruchy Browna. Znak błyskawicy symbolizuje włączenie oświetlenia. Na klatkach e-h pływak porusza się, gdy światło UV aktywuje pierwszy mechanizm katalityczny. Na schematycznym obrazie cząstki (e, i) złoty kolor reprezentuje powlekaną półkulę. Zmiana barwy światła na zieloną powoduje odwrócenie kierunku poruszania się cząstki (widoczne na i-l). Skala na klatce l ma długość 5 mikrometrów. (Źródło: Wydział Fizyki UW, M. Lisicki)

O jednej z propozycji w tym kierunku traktuje nowa praca badaczy z Wydziału Fizyki UW, ETH w Zurychu i Uniwersytetu w Cambridge, która ukazała się w czasopiśmie *Nature Communications*. Zaprezentowano w niej zmodyfikowane mikrocząstki Janusa, poruszające się w płynie pod wpływem zewnętrznego oświetlenia, których kierunek ruchu zależy od długości fali padającego światła. Cząstki o średnicy 3,5 mikrona zostały wykonane z anatazu – jednej z odmian polimorficznych dwutlenku tytanu – a jedna ich półkula została pokryta złotem. Oświetlone zielonym światłem poruszają się one w kierunku wyznaczonym przez "złotą czapkę", zaś oświetlone światłem ultrafioletowym – w przeciwnym. Cząstki zostały zsyntetyzowane na ETH w Zurychu przez dr. Hanumanthę Rao Vutukuriego i prof. Jana Vermanta.

– Przez zmianę długości fali światła aktywujemy różne mechanizmy katalityczne na powierzchni cząstek, dzięki czemu możemy bardzo szybko i w kontrolowany sposób sterować ich ruchem – mówi dr Maciej Lisicki z Wydziału Fizyki UW. – Ponadto widzimy bardzo ciekawą dynamikę kolektywną: cząstki tego typu potrafią wzajemnie się przyciągać lub odpychać, w zależności od wzajemnej orientacji i koloru oświetlenia. Obserwujemy w ten sposób gwałtowne procesy fuzji i rozszczepienia, których dynamiką możemy sterować.



Fuzja i rozszczepienie - efekty kolektywne w dynamice nowych cząstek katalitycznych. Strzałki oznaczają kierunek poruszania się cząstek, kolor znaku błyskawicy oznacza kolor oświetlenia (UV lub światło zielone). (a-f) Fuzja: ewolucja w czasie i dynamiczny wzrost skupisk cząstek prowadzi do powstania jednego skupiska. (g-l) Rozszczepienie: po zmianie koloru oświetlenia, kierunek przepływu wywołanego przez aktywne cząstki zmienia się i pojedyncze skupisko eksploduje, tworząc małe grupy cząstek. (m-p) Czerwone strzałki w kierunku półkuli z dwutlenku tytanu (jasnej części cząstki na zdjęciu) pokazują kierunek poruszania się przy oświetleniu światłem UW. (q-t) Strzałki w kolorze cyjanu pokazują kierunek ruchu przy oświetleniu zielonym światłem. Pasek skali ma długość 5 mikrometrów. (Źródło: Nature Communications 11, 2628 (2020))

Opis ruchu w takich układach wymaga uwzględnienia zarówno oddziaływań chemicznych cząstek poprzez niejednorodne pole stężenia reagentów, które powstają na ich powierzchniach, jak również poprzez przepływ płynu wywołany ich obecnością. Model teoretyczny, pozwalający opisać dynamikę nowego typu cząstek aktywnych, został stworzony przez dr. Macieja Lisickiego z UW i prof. Erica Lauge z Uniwersytetu w Cambridge.

– Przy mikrometrowych rozmiarach cząstek, ciecz wokół nich zachowuje się jak bardzo lepki płyn – mówi Maciej Lisicki. – Ich oddziaływania hydrodynamiczne mają przez to bardzo daleki zasięg, a więc ruch każdej cząstki jest odczuwany przez wszystkie inne.

Badacze, którzy od dawna zajmują się zastosowaniami zjawiska dyfuzjoforezy do transportu płynu w mikroskali i tworzenia syntetycznych pływaków uważają, że nowy, odwracalny i kontrolowany mechanizm poruszania się cząstek Janusa jest krokiem na drodze do konstrukcji bardziej złożonych mikrorobotów, które będą w stanie transportować ładunki w skali komórkowej. Może on również zostać wykorzystany do kontroli dynamiki kolektywnej w mikroskali. Lokalne oświetlenie może bowiem wywoływać ruch cząstek aktywnych w pożądanym kierunku. W zawiesinach wieloskładnikowych z dodatkiem cząstek aktywnych może to być efektywny mechanizm mieszania, które w mikroskali jest istotnym wyzwaniem technicznym.

profesora. Na Wydziale Fizyki UW studiuje ok. 1000 studentów i ponad 170 doktorantów.

PUBLIKACJE NAUKOWE:

Hanumantha Rao Vutukuri, Maciej Lisicki, Eric Lauga, Jan Vermant
"Light-switchable propulsion of active particles with reversible interactions"
Nature Communications 11, 2628 (2020).
DOI: 10.1038/s41467-020-15764-1
<https://www.nature.com/articles/s41467-020-15764-1>

KONTAKT:

dr Maciej Lisicki
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
tel. +48 605 667 471
e-mail: Maciej.Lisicki@fuw.edu.pl

POWIĄZANE STRONY WWW:

<http://www.fuw.edu.pl/~mklis/>
<http://www.softmatter.ml>

Strona domowa Macieja Lisickiego

<https://www.fuw.edu.pl>
Strona Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

<https://www.fuw.edu.pl/informacje-prasowe.html>
Serwis prasowy Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

MATERIAŁY GRAFICZNE:

FUW200603b_fot01

https://www.fuw.edu.pl/tl_files/press/images/2020/FUW200603b_fot01.jpg

Cząstka Janusa o "dwóch twarzach". Klasyczna realizacja to półkule ze złota i platyny umieszczone w roztworze wody utlenionej (H_2O_2). Platyna katalizuje rozkład wody utlenionej do wody i tlenu, powodując zwiększone stężenie produktów reakcji w stosunku do stężeń po stronie pokrytej złotem. Powoduje to powstanie przepływu wokół cząstki, a w efekcie cząstka zaczyna poruszać się z prędkością U w kierunku wyznaczonym przez jej oś symetrii. (Źródło: Wydział Fizyki UW, M. Lisicki)

FUW200603b_fot02

https://www.fuw.edu.pl/tl_files/press/images/2020/FUW200603b_fot02.jpg

Schemat nowego mechanizmu katalitycznego. Cząstka zbudowana z dwutlenku tytanu o jednej półkuli pokrytej złotem porusza się pod wpływem zewnętrznego oświetlenia. Kierunek jej ruchu zależy jednak od długości fali. Pod wpływem oświetlenia światłem zielonym cząstka porusza się w kierunku wyznaczonym przez złotą półkulę, zaś oświetlona światłem UV porusza się w kierunku przeciwnym. (Źródło: Wydział Fizyki UW, M. Lisicki)

FUW200603b_fot03

https://www.fuw.edu.pl/tl_files/press/images/2020/FUW200603b_fot03.jpg

Podwójny katalityczny mechanizm napędowy cząstek Janusa nowego typu. Cząstki składają się z anatazu (mineralnej formy dwutlenku tytanu) i mają jedną (jaśniejszą) półkulę pokrytą złotem – jak widać na obrazie z mikroskopu elektronowego w lewym górnym rogu. Obraz mikroskopowy zawiera klatki z filmu, na którym początkowo (a-d) cząstka wykonuje swobodne ruchy Browna. Znak błyskawicy symbolizuje włączenie oświetlenia. Na klatkach e-h pływak porusza się, gdy światło UV aktywuje pierwszy mechanizm katalityczny. Na schematycznym obrazie cząstki (e, i) złoty kolor reprezentuje powlekaną półkulę. Zmiana barwy światła na zieloną powoduje odwrócenie kierunku poruszania się cząstki (widoczne na i-l). Skala na klatce l ma długość 5 mikrometrów. (Źródło: Wydział Fizyki UW, M. Lisicki)

FUW200603b_fot04

https://www.fuw.edu.pl/tl_files/press/images/2020/FUW200603b_fot04.jpg

Fuzja i rozszczepienie - efekty kolektywne w dynamice nowych cząstek katalitycznych. Strzałki oznaczają kierunek poruszania się cząstek, kolor znaku błyskawicy oznacza kolor oświetlenia (UV lub światło zielone). (a-f) Fuzja: ewolucja w czasie i dynamiczny wzrost skupisk cząstek prowadzi do powstania jednego skupiska. (g-l) Rozszczepienie: po zmianie koloru oświetlenia, kierunek przepływu wywołanego przez aktywne cząstki zmienia się i pojedyncze skupisko eksploduje, tworząc małe grupy cząstek. (m-p) Czerwone strzałki w kierunku półkuli z dwutlenku tytanu (jasnej części cząstki na zdjęciu) pokazują kierunek poruszania się przy oświetleniu światłem UW. (q-t) Strzałki w kolorze cyjanu pokazują kierunek ruchu przy oświetleniu zielonym światłem. Pasek skali ma długość 5 mikrometrów. (Źródło: Nature Communications 11, 2628 (2020))

MATERIAŁY FILMOWE:

FUW200603c_mov01.mov

https://www.fuw.edu.pl/tl_files/press/images/2020/FUW200603c_mov01.mov

Film wykonany przy pomocy mikroskopu pokazuje zmianę kierunku poruszania się cząstki aktywnej pod wpływem zmiany koloru oświetlenia. Cząstka porusza się "do przodu" przy oświetleniu UV i w przeciwną stronę przy oświetleniu zielonym światłem. Kierunek ruchu jest w pełni odwracalny i sterowany jedynie przy pomocy zewnętrznego oświetlenia. Film został dwukrotnie przyspieszony. (Źródło: Nature Communications 11, 2628 (2020))



[FUW200603a - aktywne mikrocząstki.pdf \(147.5 kB\)](#)

