



Warszawa, 25 września 2018

Taniec opadających węzełków

*Czy topologia mikroobiektów może wpływać na ich ruch w środowisku? Eksperymenty i symulacje numeryczne naukowców z Polski i Szwajcarii opublikowane w czasopiśmie *Physical Review Letters* pokazują, że sposób opadania łańcuszków w lepkim płynie zależy od tego, jakiego rodzaju węzeł został na nich zapleciony. Opadając, łańcuszki tworzą płaskie toroidalne struktury złożone z kilku oplecionych pętli wirujących względem siebie. Motywacją do prezentowanych badań jest ich potencjalne znaczenie dla zrozumienia dynamiki zawężlonych nici DNA i poznania związku pomiędzy topologią biomolekuł a ich kształtem i szybkością opadania pod wpływem grawitacji lub w wirówce.*

W 1867 roku dwóch szkockich fizyków – Peter Tait i William Thomson (lord Kelvin) – badało ruch kółek z dymu wytwarzanych przez specjalnie skonstruowaną w tym celu maszynę. Uderzyła ich stabilność ruchu kółek – zaraz po powstaniu przybierały one spłaszczoną, toroidalną formę i przesuwaly się bez dalszej zmiany kształtu.

Struktury te to w istocie swojej wiry pierścieniowe, w których oś wiru tworzy zamkniętą pętlę. Kelvin pokazał, że w pozbawionej oporów cieczy taki ruch wirowy utrzymywałby się dowolnie długo. W szczególności – jak przekonywał – gdybyśmy oś wiru zawiązali w węzeł, ten nigdy się sam nie rozwiąże. Może więc – myślał Kelvin – takie właśnie zasupłane wiry (tyle że w wypełniającym wszechświat eterze) są atomami, które tworzą pierwiastki? Różne sposoby zasupłania węzłów wirowych odpowiadałyby wtedy różnym atomom.

I chociaż koncepcja ta nie wytrzymała próby czasu, to jednak rozważania Kelvina i Taita stanowiły początki całej gałęzi współczesnej matematyki – teorii węzłów, stosowanej do modelowania obserwowanych w przyrodzie struktur topologicznych. Również i w fizyce węzły, sploty i inne układy o nietrywialnej topologii pojawiają się coraz częściej – m. in. w magnetohydrodynamice opisującej m.in. przepływy plazmy w okolicy Słońca, w schematach korekcji błędów w komputerach kwantowych, w kwantowej teorii pola czy w opisie ciekłych kryształów. Węzły spotykamy też w układach biologicznych, przede wszystkim w nici DNA, która jest tak długa, że często płącze się sama, jak kabel od słuchawek w kieszeni, i dopiero specjalne enzymy – topoizomerazy – potrafią ją rozplątać.

Jedną z metod określenia rodzaju węzła, w jaki zasupłana jest nić DNA, jest poddanie jej działaniu pola elektrycznego lub siły odśrodkowej w wirówce. Okazuje się, że pod działaniem zewnętrznej siły pętle z DNA przesuwają się z różnymi prędkościami w zależności od ich topologii. Skąd bierze się ten nieoczekiwany związek? Badań tego problemu podjął się Piotr

Szymczak (z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego) we współpracy z Magdaleną Gruziel i Marią Ekiel-Jeżewską (z Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN) oraz Giovannim Dietlerem, Andrzejem Stasiakiem i Krishnanem Thyagarajanem z Lozanny. Aby lepiej zrozumieć ten nieoczekiwany związek pomiędzy topologią a dynamiką DNA zaprojektowali oni eksperyment w skali makro, w którym rolę zawężonych nici DNA odgrywały łańcuszki ze stalowych kulek. Jako płynu użyto bardzo lepkiego oleju silikonowego, aby charakter przepływu wokół kilkucentymetrowego łańcuszka był analogiczny do przepływu wokół mikroskopowej pętli DNA w wodzie.

Zachowanie łańcuszków wrzuconych do lepkiej cieczy okazało się zaskakujące. Ich ruch bardzo przypominał zachowanie kótek z dymu Taita i Kelvina. Łańcuszki rozplaszczają się, tworząc cienki torus w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku grawitacji. Torus ten złożony był z jednej lub więcej splecionych ze sobą pętli, nieustannie wirujących wokół siebie. Liczba pętli oraz sposób ich zaplotu były zależne od rodzaju węzła. Dodatkowo, cały torus obracał się dookoła swojej osi, w kierunku określonym przez skrętność węzła – struktury prawoskrętne obracały się w prawo, a ich lustrzane odbicia – w lewo.

Aby wyjaśnić to zaskakujące zachowanie opadających pętli, autorzy pracy z *Physical Review Letters* stworzyli model teoretyczny elastycznych włókien poruszających się w lepkiej cieczy, a następnie przeprowadzili symulacje numeryczne ich ruchu, które w pełni odtworzyły dynamikę obserwowaną w eksperymencie i powinny także stosować się do opisu dynamiki hydrodynamicznie podobnych obiektów w mikroskali.

Modelowanie matematyczne pozwoliło na ustalenie, że skoordynowany ruch pętli powstaje dzięki tak zwanym oddziaływaniom hydrodynamicznym pomiędzy różnymi częściami łańcucha. Każdy element łańcuszka, przesuając się, wywołuje przepływ otaczającego płynu, który działa na wszystkie inne elementy łańcucha. Właśnie te oddziaływania przenoszone przez przepływ sprzęgają ze sobą ruch pętli i sprawiają, że zaczynają one wirować względem siebie. Charakterystyki ruchu wirowego łańcuszków zależą od ich długości oraz sztywności. Co ciekawe, można też pokazać, że wiry Kelvina i Taita, jeśli zapleść je w węzeł, wykonywałyby ruch zupełnie analogiczny do obserwowanego w eksperymentach z łańcuszkami. Opadające pętle byłyby więc wizualizacją kelwinowskich atomów, gdyby te tylko istniały...

Najistotniejszy wynik tej pracy – pokazanie, że giętkie pętle z węzłami o skomplikowanej topologii opadając w cieczy mogą tworzyć uporządkowane, niemal płaskie toroidalne struktury – jest ważny dla właściwej interpretacji eksperymentów sedymentacji DNA i innych biomolekuł, o których zwykle dotychczas zakładało się, że pod wpływem siły grawitacji opadają w postaci nieuporządkowanego kulistego kłębka.

Fizyka i astronomia na Uniwersytecie Warszawskim pojawiły się w 1816 roku w ramach ówczesnego Wydziału Filozofii. W roku 1825 powstało Obserwatorium Astronomiczne. Obecnie w skład Wydziału Fizyki UW wchodzi Instytut: Fizyki Doświadczalnej, Fizyki Teoretycznej, Geofizyki, Katedra Metod Matematycznych oraz Obserwatorium Astronomiczne. Badania pokrywają niemal wszystkie dziedziny współczesnej fizyki, w skalach od kwantowej do kosmologicznej. Kadra naukowo-dydaktyczna Wydziału składa się z ponad 200 nauczycieli akademickich, wśród których jest 77 pracowników z tytułem profesora. Na Wydziale Fizyki UW studiuje ok. 1000 studentów i ponad 170 doktorantów.

PUBLIKACJE NAUKOWE:

“Periodic Motion of Sedimenting Flexible Knots”, Magdalena Gruziel, Krishnan Thyagarajan, Giovanni Dietler, Andrzej Stasiak, Maria L. Ekiel-Jeżewska i Piotr Szymczak
Physical Review Letters Volume 121, p. 127801 – 18th of September 2018;
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.127801>

KONTAKTY:

dr hab. Piotr Szymczak
Instytut Fizyki Teoretycznej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
tel. +48 22 5532909
email: piotr.szymczak@fuw.edu.pl

POWIĄZANE STRONY WWW:

<https://physics.aps.org/synopsis-for/10.1103/PhysRevLett.121.127801>
Streszczenie artykułu na stronie APS Physics

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

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

MATERIAŁY GRAFICZNE:

FUW180925b_fot01.jpg

http://www.fuw.edu.pl/press/images/2018/FUW180925b_fot01.jpg
Zawężłone pętle opadające w lepkiej cieczy: eksperyment (z lewej) i symulacja komputerowa (z prawej). (Źródło: P. Szymczak, Wydział Fizyki UW)

FUW180925b_fot02.jpg

http://www.fuw.edu.pl/press/images/2018/FUW180925b_fot02.jpg
Rycina ilustrująca eksperyment Taita i wizualizacja ruchu powietrza wokół kółka z dymu (Peter Tait, *Lectures on Some Recent Advances in Physical Science*, MacMillan & Co., London, 1876)

MATERIAŁY FILMOWE:

FUW180925c_mov01.mov

http://www.fuw.edu.pl/press/images/2018/FUW180925c_mov01.mov
Zawężłone pętle opadające w lepkiej cieczy: eksperyment. (Źródło: P. Szymczak, Wydział Fizyki UW)

FUW180925c_mov02.avi

http://www.fuw.edu.pl/press/images/2018/FUW180925c_mov02.avi
Zawężłone pętle opadające w lepkiej cieczy: symulacja komputerowa. (Źródło: P. Szymczak, Wydział Fizyki UW)