



Spacer po suficie, czyli bio-nano-technologia łapek gekona

Piotr Pierański
Politechnika Poznańska

1. Obserwacja i wynikające z niej pytanie

Któż z nas nie zna widoku muchy spacerującej po suficie. Tak przyzwyczailiśmy się do tego widoku, iż wydaje się nam to zupełnie naturalne. Nie zadajemy sobie oczywistego pytania: jak ona to robi? Pytanie to jednak pojawia się, gdy zamiast muchy, jak mi się to zdarzyło pewnego ciepłego wieczoru w Kalabrii, zobaczymy na suficie spacerującą jaszczurkę.



Rys. 1. Gekon spacerujący po suficie kalabryjskiego domu (zdjęcie autora)

Co jest do licha? Jak ona to robi? Zdumienie, towarzyszące widokowi zwierzątka o rozmiarach sporej parówki, biegającego sobie po suficie z tą zwinnością, jaka cechuje jaszczurki, skłoniło mnie do zrobienia kilku zdjęć. Na jednym z nich, patrz rys. 1., zauważyłem coś ciekawego. Zakończone czymś w rodzaju kłapek paluszki jednej z łapek były na tym zdjęciu wygięte w dół, odstając od powierzchni sufitu. Kłapki innych paluszków przylegały do niej ciasno. Czy to przypadek? Czy to wyginanie paluszków ma jakąś specjalną funkcję w sufitowym spacerze?

Po powrocie do Polski rozpocząłem poszukiwania. Oczywiście, skorzystałem z sieci internetowej – najwspanialszego źródła informacji, jakie mamy dziś do swej dyspozycji, bez względu na to, czy mieszkamy w dużym mieście, czy

w małej wsi. Po paru godzinach wiedziałem już, że to nie ja pierwszy zadałem sobie sformułowane wyżej pytania, że od dawna zadają je sobie biolodzy, że znają już na nie odpowiedź, i że ta odpowiedź znajduje się na terenie fizyki. Postaram się opowiedzieć, czego się dowiedziałem.

2. Bio-nano-technologie łapek gekona

Po pierwsze, okazuje się, że gekony (*Gekko gekko*), bo taka jest poprawna nazwa tych biegających po sufitach jaszczurek, są w stanie czynić to i wtedy, gdy jest on wykonany z gładkiego szkła. Przypuszczenie, że gekony chwytają się powierzchni wykorzystując jej nierówności i szczelinki, w które wciskałyby jakieś haczyki umieszczone na swych łapkach, okazuje się więc błędne. Przyczyna, dla której ich łapki przyczepiają się do niej, musi więc być inna.



Rys. 2. Morfologia paluszków gekona. Ich rozplaszczone końce pokryte są rządkami włosków o rozmiarach mikrometrowych. Te mikro-włoski rozszczepione są na swych końcach w miotełki nano-włosków zakończonych nano-szpatulkami

(Źródło rysunku: http://www.andrew.cmu.edu/user/gshah/gecko_foot.jpg)

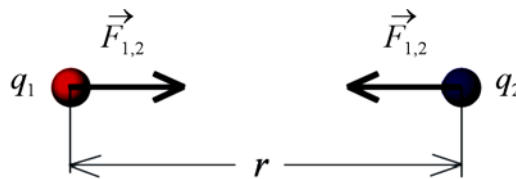
Obejrzenie łapek gekona pod mikroskopem (elektronowym) ujawnia, patrz rys. 2, że istotnie nie ma na nich żadnych haczyków, są za to rządkami mikroskopijnych włosków rozszczepionych dodatkowo na swych końcach w miotełki włosków jeszcze drobniejszych, o rozmiarach nanoskopowych, zakończonych płaskimi nano-szpatulkami. Każda miotełka składa się z 100–1000 nano-włosków.

Jaka jest ich rola? Bardzo prosta: zwiększenie powierzchni przylegania. Zastanówmy się chwilę. Dlaczego niby włoski miałyby zapewniać dobre przyleganie łapek? Zróbmy samodzielnie proste doświadczenie. Weźmy do ręki szczoteczke do zębów i przyłożmy ją do powierzchni stołu nie jej włoskami, ale odwrotną, gładką stroną główki, w której są one umocowane. Mimo pozorów, przyleganie nie będzie dobre, bo ani powierzchnia stołu, ani powierzchnia plastiku, z którego wykonana jest główka szczoteczki, nie są płaskie. W efekcie kontakt między nimi ograniczony jest do niewielu punktów. Sytuacja zmienia się radykalnie, gdy przyciśniemy szczoteczke do stołu stroną pokrytą włoskami. Statyczne przyciśnięcie pionowe szczoteczki nie jest jednak najlepszym rozwiązaniem, bowiem włoski nie są równej długości i szczoteczka oprze się o stół tylko niektórymi z nich, tymi najdłuższymi. Znacznie lepsze przyleganie uzyskamy, gdy po przyciśnięciu szczoteczki przesuniemy ją nieco w kierunku równoległym do powierzchni stołu. Przyciskane do stołu dłuższe włoski wygną się nieco, w efekcie i te krótsze wejdą w kontakt ze stołem. Tak właśnie czyni gekon, gdy przykładá swe paluszki do powierzchni sufitu.

No dobrze, wiemy już, co robi gekon, by zwiększyć liczbę punktów styku swych łapek z sufitem, ale to nie wyjaśnia sprawy, bowiem bez odpowiedzi pozostaje inne kluczowe pytanie: dlaczego w ogóle dotykające powierzchni sufitu nano-włoski przyklejają się do niej? Przecież nie są pokryte żadnym klejem – zbadanie powierzchni, po której się przeszły, ujawnia, że pozostaje ona sucha, bez śladu jakiegokolwiek kleju. Odpowiedzi na to pytanie udziela fizyka atomowa: **siłą odpowiedzialną za przyklejanie się włosków jest jedna z sił, które określane są mianem sił van der Waalsa.** Poniżej postaram się wyjaśnić jej pochodzenie i własności.

3. Siła Londona – jedna z sił van der Waalsa

Wszyscy dobrze wiemy, iż ładunki różnoimienne przyciągają się, zaś te równoimienne, odpychają. Jeśli rozważmy dwa ładunki punktowe, $q_1 = q$ i $q_2 = -q$, znajdujące się w odległości r ,

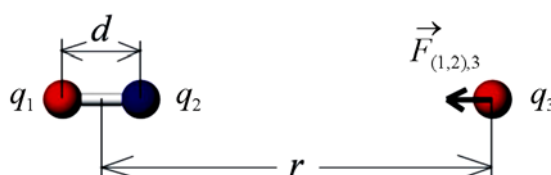


to siła oddziaływania między nimi, dana będzie znanym wzorem:

$$F_{1,2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{r^2} \propto \frac{q^2}{r^2}.$$

Zwróćmy uwagę na zależność tej siły od odległości r między oddziałującymi ładunkami, siła jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu tej odległości. Przypomnijmy też, o czym trzeba będzie pamiętać czytając dalsze rozważania, że zależność ta ma taki sam charakter w przypadku ładunków o symetrii sferycznej. Odległość r jest wtedy odległością pomiędzy środkami rozważanych sfer lub kul.

Umieścimy teraz ładunki q_1 i q_2 w małej odległości d od siebie i dodajmy trzeci ładunek, $q_3 = q$, umieszczając go na prostej łączącej ładunki q_1 i q_2 w odległości $r \gg d$ od środka łączącego je odcinka.



Obliczmy siłę działającą na ładunek q_3 . Ładunek ten jest odpychany przez mający ten sam znak ładunek q_1 i jednocześnie przyciągany przez ładunek q_2 . Siły te jednak nie równoważą się, bowiem odległości pomiędzy ładunkami q_3 i q_1 oraz q_3 i q_2 nie są identyczne: pierwsza z nich wynosi $r + d/2$, druga zaś $r - d/2$. Przeprowadźmy prosty rachunek.

Siła jaką ładunek q_1 odpycha ładunek q_3 wynosi:

$$F_{1,3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{\left(r + \frac{d}{2}\right)^2},$$

i jest mniejsza od siły, z jaką ładunek q_2 go przyciąga:

$$F_{2,3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{\left(r - \frac{d}{2}\right)^2}.$$

Siła wypadkowa, z jaką ładunki q_1 i q_2 działają na ładunek q_3 , jest więc siłą przyciągającą i wynosi:

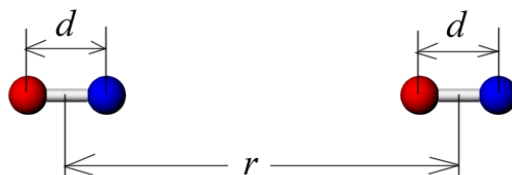
$$F_{(1,2),3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{\left(r - \frac{d}{2}\right)^2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{\left(r + \frac{d}{2}\right)^2}$$

Dla $r \gg d$, wyrażenia, które od siebie odejmujemy, różnią się niewiele. Okazuje się, że z dobrym przybliżeniem różnica ta dana jest wzorem:

$$F_{(1,2),3} \approx \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{q^2 d}{r^3} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{(qd)q}{r^3} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\mu q}{r^3}.$$

Wielkość $\mu = qd$, która pojawiła się w liczniku tego wyrażenia, nazywana jest **momentem dipolowym** pary ładunków $q_1 = -q$ i $q_2 = q$, między którymi odległość d została ustalona. Jeśli spojrzymy na mianownik uzyskanego wyrażenia, zauważymy, że siła, z jaką dipol utworzony przez ładunki q_1 i q_2 działa na ładunek q_3 , jest odwrotnie proporcjonalna do trzeciej potęgi odległości między nimi.

Przeprowadzony w podobny sposób rachunek wykazuje, że jeśli zamiast pojedynczego ładunku q_3 zbliżyć do dipola, utworzonego przez ładunki q_1 i q_2 , drugi dipol, utworzony przez ładunki, $q_3 = q$ i $q_4 = -q$, umieszczone podobnie, jak ładunki q_1 i q_2 w odległości d od siebie,



to siła oddziaływania pomiędzy tą parą dipoli wyniesie:

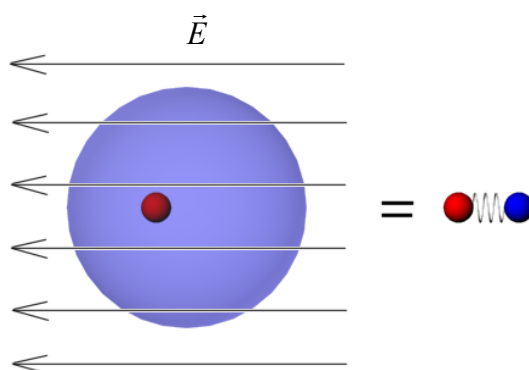
$$F_{(1,2),(3,4)} \approx \frac{3}{2\pi\epsilon_0} \frac{\mu^2}{r^4},$$

a więc okaże się odwrotnie proporcjonalna od czwartej potęgi odległości pomiędzy nimi. Jeśli oddziałujące dipole nie są identyczne, a więc na przykład odległość pomiędzy ładunkami q_3 i q_4 jest różna od odległości pomiędzy ładunkami q_1 i q_2 , to w liczniku powyższego wyrażenia pojawi się nie kwadrat momentu dipolowego, ale iloczyn momentów dipolowych poszczególnych par ładunków:

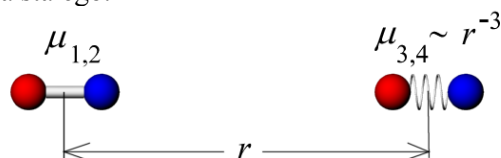
$$F_{(1,2),(3,4)} \approx \frac{3}{2\pi\epsilon_0} \frac{\mu_{(1,2)}\mu_{(3,4)}}{r^4}. \quad (*)$$

Istotne w przeprowadzonych wyżej rozważaniach jest, że oba dipole są dipolami stałymi, tzn. odległość pomiędzy tworzącymi je ładunkami jest stała. Tak jednak być nie musi, i tak nie jest, gdy rozsuniecie pary ładunków tworzących dipol następuje pod wpływem pola elektrycznego, w którym parę tę umieszczono. Z sytuacją taką mamy do czynienia, gdy obojętny atom, na przykład argonu, umieścimy w polu elektrycznym. Z punktu widzenia elektrodynamiki, atom taki jest układem dwóch ładunków: dodatniego, niemal punktowego, bowiem umieszczonego w małym jądrze, i ujemnego, rozmytych w sferyczną chmurę,

krażących wokół jądra elektronów. Środek sfery ładunku ujemnego pokrywa się z miejscem, w którym umieszczone jest jądro i struktura taka oglądana z zewnątrz jest elektrycznie obojętna. Jeśli jednak włożymy ją w pole elektryczne \vec{E} , ładunki ulegną przesunięciu i centrum ładunku ujemnego przestanie pokrywać się z centrum ładunku dodatniego: powstanie dipol indukowany, którego moment jest proporcjonalny do natężenia pola elektrycznego, w którym został umieszczony.



Załóżmy, że pole to wytwarzane jest przez inny, stały dipol elektryczny. Przeprowadzone wyżej rozważania wykazały, że pole to jest odwrotnie proporcjonalne do trzeciej potęgi odległości, w efekcie więc moment dipolowy dipola indukowanego będzie również odwrotnie proporcjonalny do trzeciej potęgi jego odległości od dipola stałego.



Mając w pamięci przeprowadzone wyżej rozważania, zastanówmy się nad zależnością siły oddziaływania pomiędzy dipolem stałym i indukowanym od odległości pomiędzy nimi. Spójrzmy na wyrażenie (*) przyjmując, że moment dipolowy $\mu_{(1,2)}$ jest stały, ale moment dipolowy $\mu_{(3,4)}$ jest indukowany przez pole pierwszego dipola – moment $\mu_{(3,4)}$ będzie więc proporcjonalny do odwrotności trzeciej potęgi odległości. W liczniku wyrażenia (*) pojawia się odwrotność trzeciej potęgi odległości. Jeśli uwzględnimy mianownik, w którym odległość znajduje się w czwartej potędze, dojdziemy do końcowego wniosku, że **siła, z jaką dipol stały przyciąga drugi, indukowany przez niego dipol, jest odwrotnie proporcjonalna do siódmej potęgi odległości!** Tak silna zależność od odległości powoduje, że by siła ta była mierzalna, dipole te muszą znaleźć naprawdę bardzo blisko siebie.

Siła, której pochodzenie i zależność od odległości opisaliśmy wyżej, pojawia się zawsze, gdy jakieś atomy albo cząsteczki znajdują się blisko siebie. W najbardziej czystej postaci pojawia się, gdy inne oddziaływania między nimi są bardzo słabe. Z sytuacją taką mamy do czynienia w przypadku gazów szlachetnych, np. argonu. Atomy te, gdy znajdują się w swym pobliżu, przyciągają się siłą odwrotnie proporcjonalną do siódmej potęgi odległości.

Pojawia się jednak pytanie, które pominęliśmy rozważając oddziaływanie pomiędzy dipolem stałym i indukowanym: a skąd bierze się ten dipol stały? Przecież izolowany atom gazu szlachetnego nie jest dipolem. Odpowiedź brzmi: istotnie, izolowany atom nie jest dipolem, gdy oglądamy jego średni kształt w czasach rzędu sekundy, ale, gdy czas ten skrócimy do femtosekund, może wyglądać jak dipol. W tak krótkich odcinkach czasu atom traci wskutek fluktuacji kwantowych sferyczną symetrię swej chmury elektronowej i środki jego ładunków ujemnych i dodatnich ulegają spontanicznym rozsunieciu. Dipole utworzone w taki sposób nazywane są dipolami fluktuacyjnymi. Jak widzimy, pełna teoria opisanej przez nas siły pojawia się dopiero na gruncie mechaniki kwantowej. Twórcą tej teorii był Fritz London. Siła, o której mówimy, nazywana jest więc siłą Londona. To jedna z sił van der Waalsa, bo tak nazywane są wszystkie siły międzycząsteczkowe odwrotnie proporcjonalne do siódmej potęgi odległości. Siła Londona jest wśród nich wyjątkowa, bowiem obecna jest zawsze, bez względu na to, jaki charakter mają oddziałujące cząsteczki. To tylko jej istnienie może wyjaśnić przyciąganie dwóch atomów gazu szlachetnego. A że atomy gazów, które ulegają skropleniu, a więc i gazów szlachetnych, muszą się przyciągać, pierwszy zrozumiał van der Waals zastanawiając się nad mikroskopowymi przyczynami prawdziwości równania stanu, które odkrył. Równanie to, zwane równaniem van der Waalsa, opisuje, w przeciwieństwie do równania stanu gazu idealnego, również proces skraplania i fazę ciekłą. Gazy nie ulegałyby skropleniu, gdyby ich cząsteczki nie przyciągały się. Mówiąc dokładniej, gdyby siły, które między nimi działają, były wyłącznie odpychające, przechodziłyby przy wzroście ciśnienia bezpośrednio do fazy stałej. Pojawienie się fazy ciekłej to bezpośredni dowód na istnienie sił przyciągania. To właśnie zrozumiał van der Waals.

4. Gekon w laboratorium

Wróćmy do gekona. Ciekawe, jak wielka jest siła, z jaką łapki gekona przylegają do powierzchni, po której biega? Naukowcy badający przyleganie łapek gekona do różnych powierzchni wykonali doświadczenie, w którym jeden wypreparowany mikro-włosek został przyciśnięty swą nano-szczoteczką do powierzchni (wykonujący doświadczenie pamiętali, by, jak to czyni gekon, po przyciśnięciu szczoteczki do powierzchni miernika, lekko ją po niej przesunąć). Następnie, ciągnąc za włoszek, zmierzono siłę potrzebną do jego oderwania. Siła ta wyniosła około 200 μN . Niewiele, ale jeśli siłę tę pomnożyć przez liczbę

nano-włosek znajdujących się na wszystkich paluszkach gekona, a liczba ta jest rzędu 2 milionów, otrzymamy imponującą wartość 400 N. Teoretycznie rzecz biorąc, gekon mógłby więc mieć masę 40 kg i dalej wisiałby sobie na suficie. Oczywiście, to tylko teoria. Nie wszystkie nano-włoski, którymi dysponuje gekon, wchodzi w kontakt z powierzchnią. Liczba tych, które to czynią, jest jednak zawsze wystarczająca, by gekon, którego masa nie przekracza 200 g, mógł swobodnie biegać po suficie, robiąc na nim gimnastyczne ewolucje, nawet wisząc przyczepiony do niej jedną tylko nogą.

Pozostaje odpowiedź na pytanie, które sobie zadałem, dostrzegając na wykonanym w Kalabrii zdjęciu wygięte w dół paluszki gekona. Po co on je, do licha, wygina? Odpowiedzi możemy się domyśleć sami bawiąc się taśmą klejącą. Zastanówmy się: jak ją odrywamy od powierzchni, do której się przykleiła? Ano, chwytamy za koniec i odciągamy go od powierzchni – taśma odkleja się kawałek po kawałku. Gekon ma ten sam problem. Przyklejony paluszek tak silnie przylega do powierzchni, że trudno jest go oderwać w całości. Wyginając swe paluszki, gekon odkleja je od powierzchni sufitu kawałek po kawałku. Zaczyna, oczywiście, od końca.

3. Dalsza lektura i wnioski praktyczne

Czytelników zainteresowanych szczegółami odsyłam do pracy K. Autumn, Y.A. Liang, M. Sitti, A.M. Peattie, W.R. Hansen, S. Sponberg, T. Kenny, R. Fearing, J.N. Israelachvili, R.J. Full *Evidence for van der Waals attachment by gecko foot-hairs inspires design of synthetic adhesive*. PNAS **99**, 12252 (2002). Interesujące jest rozszyfrowanie naukowych specjalności autorów tej pracy. Kellar Autumn jest biologiem, Ronald Fearing jest inżynierem elektrykiem, Jacob Israelachvili i Thomas Kenny są fizykami. Jak widać, dokonanie ciekawego odkrycia wymaga niekiedy współpracy naukowców o różnych specjalnościach. Opisanymi wyżej badaniami zainteresowali się inżynierowie-praktycy dochodząc do wniosku, że można je zastosować w praktyce wytwarzając suchą taśmę klejącą, której powierzchnia, zamiast kleju, pokryta byłaby nano-włoskami. Pomysł sprawdzono. Działa.