Nigdy Cię nie zobaczę?

Kamila ŁYCZEK, Mariusz SKAŁBA**

* Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki, Uniwersytet Warszawski

Niniejszy tekst nawiązuje do artykułu *Widoczność w nieskończonym lesie*, Δ^4_{20}.

– *Hop, hop, jest tam kto?* – krzyczy α otoczona tłumem.
– *Hop, hop, spójrz tutaj.* – odpowiada β, który co prawda słyszy α, ale zupełnie jej nie widzi.
– *Jakie „tutaj"? Przecież dookoła nie ma żywej duszy.* – α otoczona tłumem po raz kolejny usiłuje dostrzec β pośród otaczającej pustki.

Dookoła ludzi tłum, a jakby nikogo nie było... Przyjrzyjmy się światu, w którym α i β próbują się bezskutecznie dostrzec. Na zwykłej płaszczyźnie

$$\mathbb{R}^2 = \{(x, y) : x, y \in \mathbb{R}\},$$

w każdym jej punkcie o wymiernych współrzędnych (x, y) siedzi samotny człowiek i... wypatruje towarzysza, kierując tęsknie wzrok w losowo obranym kierunku. Ten losowy kierunek jest wyznaczony przez wybór punktu na ruletce o promieniu 1 – zadekretowane prawdopodobieństwo wylosowania półprostej wzroku przebijającej brzeg ruletki na łuku A wynosi $[A]/2\pi$ ($[A]$ oznacza długość łuku A). Oczywiście każdy ma swoją osobistą ruletkę i każdy *wykręca* kierunek swojego spojrzenia niezależnie.

Dla $\alpha \in \mathbb{Q}^2$ niech Z_α oznacza zdarzenie, że α kogoś widzi. Wykażemy, że $\mathbb{P}(Z_\alpha) = 0$, niestety... Zauważmy, że moc zbioru prostych $\alpha\beta$, gdzie $\beta \in \mathbb{Q}^2$, $\beta \neq \alpha$, jest nie większa niż moc zbioru punktów $\beta \in \mathbb{Q}^2$, $\beta \neq \alpha$. Oznacza to, że moc zbioru tych prostych jest przeliczalna – stąd teza.

Ale nie tylko α nikogo nie widzi. Ponieważ miara probabilistyczna jest przeliczalnie addytywna, więc również

$$\mathbb{P}\Big(\bigcup_{\alpha \in \mathbb{Q}^2} Z_\alpha\Big) = 0.$$

Zatem zdarzenie przeciwne jest pewne

$$\mathbb{P}\Big(\bigcap_{\alpha \in \mathbb{Q}^2} Z'_\alpha\Big) = 1,$$

czyli **prawie na pewno nikt nikogo nie widzi**. Zauważmy, że założenie o niezależności rozglądania się różnych osób jest w zasadzie zbędne.

Cud to z definicji zjawisko, które zdarza się z prawdopodobieństwem 0.

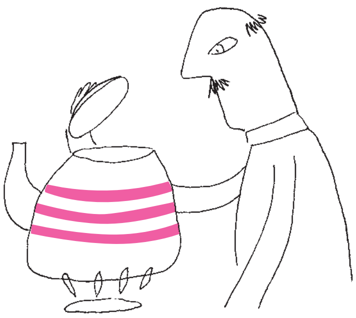
No dobrze... Wiemy skądinąd, że zdarzenie niemożliwe może się zdarzyć. Wyobraźmy sobie, że jakimś *cudem* α spojrzała w przestrzeń tak, że zobaczyła swoją drugą połówkę, którą jest β (oczywiście $\beta \neq \alpha$). Mimo cudu nie zdołają się zobaczyć! Na drodze między α i β, dokładnie w połowie, stoi bowiem $\gamma = \alpha/2 + \beta/2$ (rzecz jasna $\gamma \in \mathbb{Q}^2$). Oznacza to, że α nie widzi β, ponieważ jest zasłonięty przez γ. Oczywiście z podobnych powodów α nie widzi γ. Idąc dalej tym tropem, dochodzimy do wniosku, że **na pewno (bez wyjątków i cudów) nikt nie widzi nikogo** (bez żadnego modelu probabilistycznego!).

Hmm... Coś jest nie tak w naszym świecie – po prostu ludzie siedzą za gęsto i to prowadzi do powyższych paradoksów interpretacyjnych. Zmieńmy ten świat na lepszy! Usadowmy ludzi wyłącznie w punktach kraty całkowitoliczbowej $\mathbb{Z}^2$. Oczywiście wcześniejszy model probabilistyczny znowu jest użyteczny i daje pewien wgląd w beznadziejną sytuację ludzkości: **nikt nie dostrzega innych, prawie na pewno**.

Pojawia się jednak naturalne pytanie o prawdopodobieństwo zdarzenia, że losowo sobie przeznaczeni $\alpha \in \mathbb{Z}^2$ oraz $\beta \in \mathbb{Z}^2$ mogą się zobaczyć, jeśli spojrzą we właściwym kierunku. Niech zatem $\alpha = (a_1, a_2)$ oraz $\beta = (b_1, b_2)$. Łatwo, *nomen omen*, widzieć, że α i β mogą się zobaczyć wtedy i tylko wtedy, gdy nikt nie stoi im na drodze, czyli $\mathrm{NWD}(b_2 - a_2, b_1 - a_1) = 1$. Dowodzi się w teorii liczb, że

$$\lim_{N\to\infty} \frac{\mathrm{card}\{(a, b) | a, b \in \{1, 2, \ldots, N\}, \mathrm{NWD}(a, b) = 1\}}{N^2} = \frac{6}{\pi^2} \approx 0{,}6079.$$

Oto szkic rozumowania prowadzącego do tego intrygującego wyniku. Niech $m > 1$ będzie dowolną, ale ustaloną liczbą naturalną. Jakie jest prawdopodobieństwo, że losując spośród liczb naturalnych, otrzymamy taką, która będzie podzielna przez m? Intuicja podpowiada, że $1/m$: jeśli losujemy tę liczbę ze zbioru



$\{1, 2, 3, \ldots, n\}$, i wylosowanie każdej liczby jest jednakowo prawdopodobne, to prawdopodobieństwo P_n rozważanego zdarzenia wynosi dokładnie

$$P_n = \frac{\lfloor n/m \rfloor}{n} \quad \text{i oczywiście} \quad \lim_{n\to\infty} P_n = \frac{1}{m}.$$

Należy więc uznać (można to łatwo sformalizować), iż prawdopodobieństwo zdarzenia E_m, że dwie **niezależnie** wylosowane liczby całkowite a, b są obie podzielne przez m, wynosi $1/m^2$. Prawdopodobieństwo zdarzenia przeciwnego E'_m wynosi zatem $1 - 1/m^2$. Niech teraz

$$p_1 = 2, \quad p_2 = 3, \quad p_3 = 5, \quad p_4 = 7, \quad \ldots$$

będzie ciągiem rosnącym wszystkich liczb pierwszych. Zauważmy, że a i b są względnie pierwsze wtedy i tylko wtedy, gdy nie są podzielne równocześnie przez żadną liczbę pierwszą p_k, czyli gdy zajdzie zdarzenie $\bigcap_k E'_{p_k}$. Przyda się teraz obserwacja, że jeśli $\mathrm{NWD}(m_1, m_2) = 1$, to zdarzenia E_{m_1} oraz E_{m_2} są niezależne – wynika to stąd, że liczba całkowita dzieli się jednocześnie przez m_1 oraz m_2, gdy dzieli się przez $m_1 m_2$ oraz ze wzoru $1/(m_1 m_2) = 1/m_1 \cdot 1/m_2$. Uogólniając tę obserwację, widzimy, że zarówno (E_{p_k}), jak i (E'_{p_k}) są ciągami zdarzeń niezależnych. W szczególności zachodzi

$$\mathbb{P}\big(\mathrm{NWD}(a, b) = 1\big) = \mathbb{P}\Big(\bigcap_k E'_{p_k}\Big) = \prod_k \mathbb{P}(E'_{p_k}) = \prod_k \Big(1 - \frac{1}{p_k^2}\Big).$$

Już Leonhard Euler zauważył, że dla $s \in \mathbb{R}$, $s > 1$ mamy

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s} = \prod_{k=1}^{\infty} \frac{1}{1 - 1/p_k^s}.$$

Formalnie ta tożsamość wynika ze wzoru na sumę ciągu geometrycznego

$$1 + \frac{1}{p_k^s} + \frac{1}{p_k^{2s}} + \ldots = \frac{1}{1 - 1/p_k^s}$$

i twierdzenia o jednoznacznym rozkładzie każdej liczby naturalnej na iloczyn potęg liczb pierwszych. Wyżej występujące szeregi i iloczyny nieskończone są rzeczywiście zbieżne, ale mówi się, że Euler specjalnie tym się nie przejmował. Geniusz Eulera przejawił się jednak szczególnie wtedy, gdy obwieścił światu, że

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{6},$$

i przedstawił wyprowadzenie tego wyniku. Jak na dzisiejsze standardy ścisłości matematycznej jego uzasadnienie nie było do końca zadowalające, ale w zasadzie poprawne. To, że powyższy szereg, tylko niewinnie różniący się od szeregu

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 + n} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n(n+1)} = \sum_{n=1}^{\infty} \Big(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1}\Big) = \Big(1 - \frac{1}{2}\Big) + \Big(\frac{1}{2} - \frac{1}{3}\Big) + \ldots = 1,$$

ma tak intrygującą sumę, zakrawa na *cud*!

Patrz odpowiedni przypis na wcześniejszej stronie: Euler się zdarza raz na ludzkość!

Naszkicowaliśmy zatem dowód faktu, że przeznaczeni sobie mają więcej niż 3 szanse na 5, że nikt im nie stanie na przeszkodzie.

Zadania

Przygotował Andrzej MAJHOFER

F 1013. Rowerzysta jedzie z prędkością $v = 8$ m/s wzdłuż prostej, poziomej drogi. Las rosnący po obu stronach drogi osłania ją od wiatru. Poza lasem, prostopadle do drogi, wiatr wieje z prędkością $u = 6$ m/s. Ile razy większą mocą rowerzysta musi napędzać rower, jeśli chce utrzymać stałą prędkość jazdy po wyjechaniu spod osłony lasu.
Wskazówka: siła oporu powietrza jest proporcjonalna do kwadratu prędkości poruszającego się względem niego ciała.
Rozwiązanie na str. 6

F 1014. Szereg promieniotwórczy rozpoczynający się izotopem ^{238}U, o czasie połowicznego rozpadu $\tau \approx 4{,}47 \cdot 10^9$ lat, kończy stabilny izotop ^{206}Pb. Jaką objętość V, w warunkach normalnych, wypełniłby dzisiaj hel, który powstał w wyniku rozpadu $m = 1$ kg ^{238}U obecnego w chwili powstania Ziemi? Wiek Ziemi oceniany jest na $t_Z \approx 4{,}54 \cdot 10^9$ lat.
Rozwiązanie na str. 5