

# Przypadkowość w fizyce klasycznej i kwantowej

Marek Kuś

Centrum Fizyki Teoretycznej PAN  
Międzynarodowe Centrum Ontologii Formalnej, Politechnika Warszawska

# Problem

## ▶ **Trzy pytania o to samo:**

- ▶ Co jest źródłem przypadkowości w naturze?
- ▶ Jaki jest status metafizyczny przypadkowości i jak to rozstrzygnąć?
- ▶ Czy w naturze istnieją zjawiska "przypadkowe same przez się", czy też przypadkowość wynika z naszej niewiedzy?

## (Pre)historia

- ▶ **Świat deterministyczny, przypadkowość=niewiedza**
- ▶ **Leucyp** (Diels, *Die Fragmente der Vorsokratiker, griechisch und deutsch*, 1903, Fr. 54. 2)

350 54. LEUKIPPOS. B. FRAGMENTE. 2. 55. DEMOKRITOS.

ΠΕΡΙ ΝΟΥ.

Vgl. 54 A 28 ff., 55 A 33; B 5<sup>e</sup>.

2. AET. 1 25, 4 (D. 321) Λεύκιππος πάντα κατ' ἀνάγκην, τὴν δ' αὐτὴν ὑπάρχειν εἰμαρμένην. λέγει γὰρ ἐν τῷ Περὶ νοῦ·

5 οὐδὲν χρῆμα μάτην γίνεται, ἀλλὰ πάντα ἐκ λόγου τε καὶ ὑπ' ἀνάγκης.

---

ÜBER GEIST.

2. Kein Ding entsteht ohne Ursache, sondern alles aus bestimmtem Grunde und unter dem Drucke der Notwendigkeit.

*Nic nie dzieje się bez przyczyny, lecz wszystko pod naciskiem konieczności.*

- ▶ **Demokryt** (Diels, *Die Fragmente der Vorsokratiker,...*, Fr. 55. B 119)

ἄνθρωποι τύχης εἶδωλον ἐπλάσαντο πρόφασιν ἰδίης ἀβουλίας.

119. Die Menschen haben sich ein Idol des Zufalls gebildet zur Beschönigung ihrer eigenen Ratlosigkeit.

*Ludzie z przypadku uczynili bożka, dla usprawiedliwienia swej własnej bezradności (głupoty)*

- ▶ **Świat niedeterministyczny, istnieją zjawiska przypadkowe "same z siebie"**
  - ▶ **Epikur** (Cicero, *De natura deorum*, I, XXV)

Velut Epicurus cum videret, si atomi ferrentur in locum inferiorem suoapte pondere, nihil fore in nostra potestate, quod esset earum motus certus et necessarius, invenit quo modo necessitatem effugeret, quod videlicet Democritum fugerat: ait atomum, cum pondere et gravitate directo deorsus feratur, declinare paululum.

*Epikur widząc, że gdyby atomy dążyły ku dołowi na skutek swego ciężaru, to ponieważ ruch ich byłby dokładnie oznaczony i konieczny, nic nie zostawałoby w naszej mocy, wymyślił sposób uniknięcia tej konieczności, który najwyraźniej umknął Demokrytowi, mianowicie, że atom, gdy pod wpływem wagi i ciężkości spada prosto ku dołowi, zbacza nieco z drogi.*

- ▶ Jaki status nadają przypadkowości/prawdopodobieństwu podstawowe teorie fizyczne?
- ▶ Czy mechanika klasyczna jest deterministyczna a kwantowa probabilistyczna?
- ▶ Czy są jeszcze jakieś "rozszerzenia" tych teorii warte analizy z punktu widzenia tego problemu?

## Układy deterministyczne

- ▶ Układ jest deterministyczny, gdy dla każdego stanu układu w dowolnej chwili  $t_0$  istnieje dokładnie jeden stan tego układu w dowolnej innej chwili czasu  $t_1 > t_0$ , zgodny z prawami dynamiki obowiązującymi dla tego układu.
- ▶ Nie żądamy istnienia "funkcyjnej zależności". (Oczywiście, gdy taka jednoznaczna zależność istnieje, to układ jest deterministyczny)
- ▶ Nie odwołujemy się do jakiegokolwiek "przewidywalności". (Oczywiście jeśli jesteśmy w stanie jednoznacznie przewidzieć przyszłe stany, to układ jest deterministyczny)

## Determinizm w mechanice klasycznej można, po prostu, zadekretować

- ▶ *Z doświadczenia wynika, że jednoznaczna znajomość wszystkich współrzędnych i prędkości całkowicie określa stan układu i w zasadzie pozwala przewidzieć dalszy jego ruch.*

L. Landau, E. Lifszic *Mechanika*, 1958

- ▶ *Na przykład mechanika klasyczna rozpatruje ruch układów, których przyszłość i przeszłość jest jednoznacznie określona przez początkowe położenia i początkowe prędkości wszystkich punktów układu.*

V. I. Arnold, *Równania różniczkowe zwyczajne*, 1971

- ▶ *Początkowy stan układu mechanicznego ... określa jednoznacznie cały ruch układu Nie dziwi nas ten fakt, ponieważ dowiadujemy się o nim bardzo wczesnie. Można wyobrazić sobie świat, w którym dla określenia przyszłości układu trzeba w chwili początkowej znać także przyspieszenia. Z doświadczenia wynika, że nasz świat nie jest taki.*

V. I. Arnold, *Metody matematyczne mechaniki klasycznej*, 1974

- ▶ **Pierre-Simon Laplace** *Essai philosophique sur les probabilités*, 1814

Une intelligence qui pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée, et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvemens des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé, serait présent à ses yeux.

*Intelekt, który w danej chwili czasu znałby wszystkie siły poruszające przyrodę oraz położenia wszystkich ciał, które się na nią składają i wystarczająco niezmierny, aby objąć analizą te wszystkie dane, byłby w stanie ująć w jednej formule ruchy, zarówno największych ciał we wszechświecie, jak i najmniejszych atomów; dla takiego intelektu nic nie byłoby nieprzewidywalne, zarówno przyszłość, jak i przeszłość stałyby przed jego oczami.*



Dlaczego więc nie jesteśmy w stanie przewidzieć dokładnie dalszych losów układu?

- ▶ Chaos deterministyczny
  - ▶ nie umiemy wyznaczyć/zmierzyć stanu początkowego z dowolną dokładnością ze względu na ograniczenia naszej i naszej aparatury pomiarowej)
  - ▶ układ wykazuje niestabilność polegająca na tym, że małe niedokładności w chwili początkowej mają wielkie skutki w przyszłości
  - ▶ układ składa się z wielu części, jego stan wyznaczony jest jednoznacznie przez stany części (parametry ukryte), do których nie mamy dobrego dostępu
- ▶ Przypadkowość epistemiczna ("demokrytejska") - wynika z niewiedzy

## Czy mechanika klasyczna jest deterministyczna?

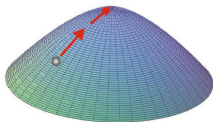
- ▶ Determinizm mechaniki klasycznej uzasadnia się równaniami Newtona

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x})$$

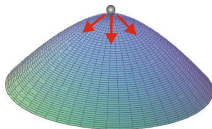
- ▶ Czy to wystarcza?
- ▶ NIE! Równania muszą mieć jednoznaczne rozwiązania dla zadanych warunków początkowych.
- ▶ Z matematycznego punktu widzenia sprowadza się to pewnych technicznych warunków, które musi spełniać  $\mathbf{F}$
- ▶ A z punktu widzenia fizyki? Czy zawsze mamy taką jednoznaczność rozwiązań?

# Wspinaczka na kopułę

- ▶ Spróbujmy ustawić kulkę **dokładnie** na wierzchołku



- ▶ To może trwać nieskończenie długo (kulka zwalnia w czasie wspinaczki...) Czy można to zrobić w **skończonym** czasie? Jeśli tak, to mamy problem...
  - ▶ Możemy wybrać dowolnie moment, w którym kulka zatrzyma się na wierzchołku przez odpowiedni wybór chwili rozpoczęcia eksperymentu
  - ▶ Prawa mechaniki są odwracalne w czasie...
  - ▶ ... spoczywająca w bezruchu kulka zaczyna się w pewnym momencie staczać



## Czy mechanika klasyczna jest deterministyczna?

- ▶ Czy taką kopułę da się skonstruować? (TAK, Norton 2003)
- ▶ Założenia idealizacyjne nie są bardziej drastyczne niż w wypadkach, z którym mechanika klasyczna radzi sobie doskonale (np. kopuła półkulista).
- ▶ Warunki jednoznaczności rozwiązań nie są spełnione na wierzchołku.
- ▶ Układ nie jest deterministyczny (zgodnie z przyjętą definicją)
- ▶ Mechanika klasyczna wymaga uzupełnienia o dodatkowe prawa? Jak ich szukać?

CONCILIATION

DU



VERITABLE DÉTERMINISME MÉCANIQUE

AVEC

L'EXISTENCE DE LA VIE ET DE LA LIBERTÉ MORALE;

MÉMOIRE DE M. J. BOUSSINESQ

PROFESSEUR A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE LILLE ;

PRÉCÉDÉ D'UN RAPPORT

A L'ACADÉMIE DES SCIENCES MORALES ET POLITIQUES

PAR M. PAUL JANET

MEMBRE DE L'INSTITUT.

---

PARIS

—  
1878

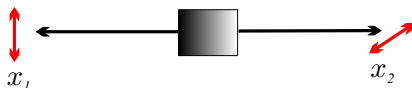
les phénomènes de mouvement doivent se diviser en deux grandes classes. La première comprendra ceux où les lois mécaniques exprimées par les équations différentielles détermineront à elles seules la suite des états par lesquels passera le système, et où, par conséquent, les forces physico-chimiques ne laisseront aucun rôle disponible à des causes d'une autre nature. Dans la seconde classe se rangeront, au contraire, les mouvements dont les équations admettront des intégrales singulières, et dans lesquels il faudra qu'une cause distincte des forces physico-chimiques intervienne, de temps en temps ou d'une manière continue, sans d'ailleurs apporter aucune part d'action mécanique, mais simplement pour *diriger* le système à chaque bifurcation d'intégrales qui se présentera.

*Zjawiska ruchu powinny być więc podzielone na dwie klasy. Pierwsza obejmuje te, dla których prawa mechaniki w postaci równań różniczkowych wyznaczą, same przez się, sekwencje stanów, przez które układ będzie przechodził. Siły fizyko-chemiczne nie pozostawiają tu roli żadnym innym przyczynom. Do drugiej klasy zaliczymy te ruchy, dla których równania dopuszczają rozwiązania osobliwe, i dla których potrzebna będzie przyczyna różna od sił fizyko-chemicznych, interweniująca, od czasu do czasu lub w sposób ciągły, bez pośrednictwa jakiegokolwiek oddziaływania mechanicznego, tylko po to, aby, po prostu, kierować układem w każdym takim punkcie bifurkacji, który się pojawi.*

- ▶ Czy mechanika kwantowa jest teorią przypadkową dlatego, że nie daje "kompletnego opisu rzeczywistości" (**A. Einstein, B. Podolski, N. Rosen**, 1935)?
  - ▶ Można ten opis uczynić kompletnym poprzez identyfikację i określenie wartości "parametrów ukrytych".
  - ▶ Przypadkowość wyników pomiarów jest efektem naszej niedostatecznej wiedzy dotyczącej tych parametrów (indeterminizm "demokrytejski")
  - ▶ Mechanika kwantowa jest więc tylko odmianą klasycznej mechaniki statystycznej
- ▶ Czy dlatego, że natura, sama z siebie, jest przypadkowa (indeterminizm "epikurejski")?
- ▶ Jak to sprawdzić?

# Kwantowy test przypadkowości

- ▶ Doświadczenie typu EPR



- ▶ Klasyczne prawa prawdopodobieństwa narzucają ograniczenia na korelacje między częściami układu (nierówności Bella)
- ▶ Jeśli znajdziemy taki stan kwantowy, dla którego nierówność Bella jest złamana, a następnie zmierzmy, że tak jest w rzeczywistości to oznaczać to będzie, że prawdopodobieństwa nie są klasyczne  $\Rightarrow$  nie ma parametrów ukrytych  $\Rightarrow$  przypadkowość jest cechą natury a nie skutkiem niewiedzy (nieznajomości wartości parametrów ukrytych)
- ▶ Doświadczenie Aspecta i “loophole-free tests” (2015)



- ▶ **Problem:** Doświadczenie wymaga wielu pomiarów, z różnymi **przypadkowymi** ustawieniami przyrządów pomiarowych
- ▶ Nie można osłabić wymogu przypadkowości. Przy nieprzypadkowych ustawieniach przyrządów otrzymane wyniki można wytłumaczyć za pomocą parametrów ukrytych (D. E. Koh *et al.*, 2012)
- ▶ Nieprzyjemne *petitio principii*: możemy wykazać, że istnieją procesy "prawdziwie przypadkowe" tylko jeśli założymy, że takowe istnieją!
- ▶ Determinizm vs. przypadkowość nie jest bezpośrednio związany z dynamiką, ale z własnościami stanów
- ▶ Mechanika klasyczna jest deterministyczna, bo istnieją stany bezdyspersyjne (wartości wszystkich obserwabli w tych stanach są jednoznaczne), a ewentualna przypadkowość wynika z naszej nieumiejętności zidentyfikowania takiego stanu w konkretnej sytuacji
- ▶ Mechanika kwantowa, w której nie ma stanów bezdyspersyjnych (zasada nieoznaczoności) jest niedeterministyczna.

## Wzmacnianie przypadkowości

- ▶ Jednak w pewnym sensie mechanika kwantowa jest "bardziej niedeterministyczna" niż klasyczna

- ▶ Źródło ciągu przypadkowych bitów  $b_1, b_2, \dots$  ( $b_k = 0, 1$ )

$$\frac{1}{2} - \varepsilon \leq P(b_{k+1} = 0 | b_1, \dots, b_k) \leq \frac{1}{2} + \varepsilon$$

- ▶  $\varepsilon = 0$  - proces całkowicie przypadkowy (wyniki 0 i 1 jednakowo prawdopodobne)

- ▶ Czy z procesu o danym  $\varepsilon$  można otrzymać inny z  $\varepsilon' < \varepsilon$

- ▶ klasycznie: **nie** (M. Santha, U. V. Vazirani, 1984)

- ▶ kwantowo: **tak** (Pironio *et al.*, 2010)

- ▶ Albo świat jest całkowicie deterministyczny, albo istnieje proces całkowicie przypadkowy

# Przypadkowość w mechanice kwantowej, a jej interpretacje

- ▶ Zaprezentowany dotychczas opis nie jest “neutralny” ontologicznie.
  - ▶ “standardowa”, “ortodoksyjna” interpretacja mechaniki kwantowej:
  - ▶ opis za pomocą funkcji falowej niepozwalającej na przewidzenie wyniku konkretnego doświadczenia (Einstein miał rację, opis nie jest zupełny, ale już niczego poza funkcją falowa nie ma...)
  - ▶ *the idea of an objective real world whose smallest parts exist objectively in the same sense as stones or trees exist, independently of whether or not we observe them . . . is impossible* (Heisenberg, 1958)
  - ▶ skończona szybkość przekazywania informacji
  - ▶ w konsekwencji: mierzone wartości obserwabli nie są “zawartymi w nim” własnościami mierzonego układu
  - ▶ przypadkowość jest “zawarta” w ontologii, która pozwala na taki opis
- ▶ Inne interpretacje (Bohm)
  - ▶ ontologia: cząsteczki o określonych pozycjach
  - ▶ źródłem przypadkowości dynamiki jest, podobnie jak w mechanice klasycznej, jest niepunktowy rozkład w stanie początkowym (wyznaczony przez funkcję falową).

## Co więc wiemy?

- ▶ Mechanika klasyczna jest albo niedeterministyczna, albo niekompletna, ale nie wiadomo jak ją "uzupełnić", albo jak wykorzystać do "produkcji prawdziwie przypadkowych procesów"
- ▶ Mechanika kwantowa jest (raczej?) niedeterministyczna, ale nie wiadomo jak to udowodnić. Pozwala jednak "wzmacniać prawdopodobieństwo"
- ▶ *After over two centuries and a quarter, Kant's Third Antinomy is still alive and kicking* (Ch. Wüthrich, 2012)



- ▶ M. Kuś, *Classical and Quantum Sources of Randomness*, [w:] T. Bigaj and C. Wüthrich (wyd.) *Metaphysics in Contemporary Physics*, Brill, Leiden, 2015, pp. 425–436.
- ▶ M. N. Bera, A. Acín, M. Kuś, M. W. Mitchell, M. Lewenstein, *Randomness in quantum mechanics: philosophy, physics and technology*, Rep. Progr. Phys. **80**, 124001 (2017)
- ▶ T. I. Tylec, M. Kuś, *Ignorance is a bliss: Mathematical structure of many-box models*, J. Math. Phys. **59**, 032202 (2018).
- ▶ M. Kuś, *Czy możemy wykazać istnienie zjawisk całkowicie przypadkowych?* Zagadnienia Filozoficzne w Nauce, **65**, 111–143 (2018).