

# Metody statystyczne

## Zestaw zadań numer 1

Vitalii Urbanevych

*vitalii.urbanevych@doctoral.uj.edu.pl*

2021

## "Numerical recipes"

W.H. Press, S.A. Teukolsky

W.T. Vetterling, B.P. Flannery

Cambridge University Press

# Funkcja gęstości prawdopodobieństwa (FGP)

## FGP

$$f_X(x), x \in [a, b]$$

$X$  - ciągła zmienna losowa

Prawdopodobieństwo że zmienna  $x$  jest w przedziale  $x_0 \leq x \leq x_1$  :

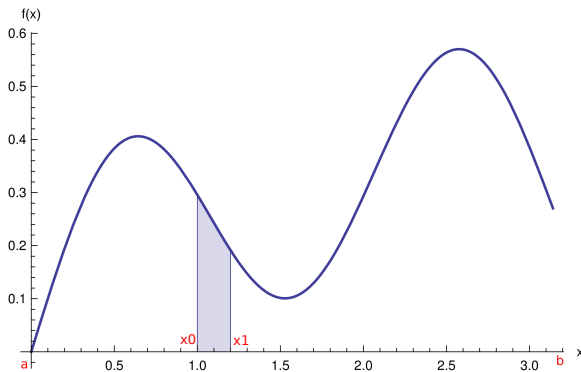
$$P(x_0 \leq x \leq x_1) = \int_{x_0}^{x_1} f_X(x) dx$$

## Normalizacja

$$P(a \leq x \leq b) = \int_a^b f_X(x) dx = 1$$

# Funkcja gęstości prawdopodobieństwa(FGP)

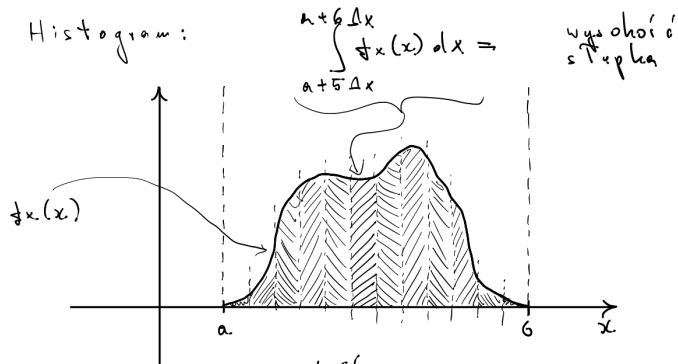
$P(x = x_0)$  nie ma sensu!



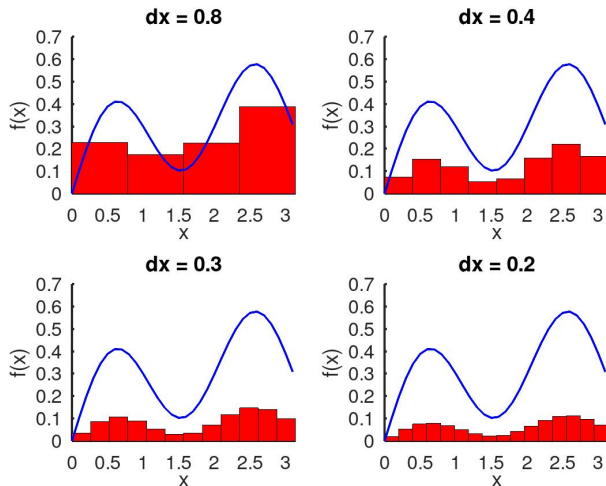
Powierzchnia pod linią:

$$P(x_0 \leq x \leq x_1) = \int_{x_0}^{x_1} f_X(x) dx$$

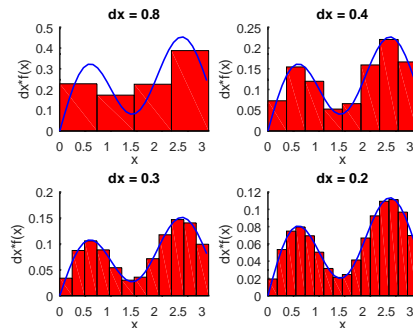
# Histogram



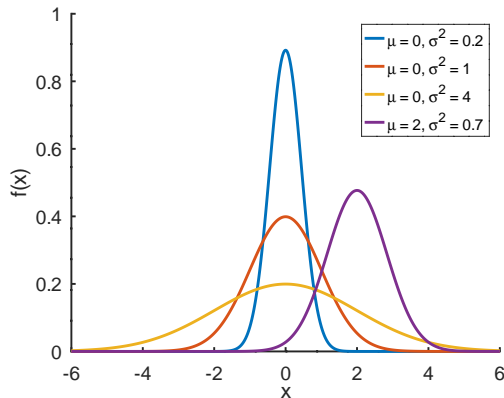
# Histogram



Porówniając histogram z FGP należy pamiętać o  $\Delta x$ !



# Rozkład normalny $N(\mu, \sigma^2)$



$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

$\mu$  - wartość oczekiwana;  
 $\sigma$  - odchylenia standardowe  
(równoważnie:  $\text{var}(X) = \sigma^2$ )

$x_1, x_2$  - losowane z rozkładu jednorodnego na przedziale  $(0,1)$

Chcemy zgenerować  $y_1, y_2$  - z rozkładu normalnego



## Metoda Boxa-Mullera

$x_1, x_2$  - losowane z rozkładu jednorodnego na przedziale  $(0,1)$

$$\begin{aligned} y_1 &= \sqrt{-2 \ln(x_1)} \cos(2\pi x_2) \\ y_2 &= \sqrt{-2 \ln(x_1)} \sin(2\pi x_2) \end{aligned} \quad \Longrightarrow \quad \begin{aligned} x_1 &= \exp\left(-\frac{1}{2}(y_1^2 + y_2^2)\right) \\ x_2 &= \frac{1}{2\pi} \operatorname{atan}\left(\frac{y_2}{y_1}\right) \end{aligned}$$

$$f_Y(y_1, y_2) dy_1 dy_2 = f_X(x_1, x_2) \left| \frac{\partial(x_1, x_2)}{\partial(y_1, y_2)} \right| dy_1 dy_2,$$

$$f_X(x_1, x_2) = 1 \text{ (rozkład jednorodny)}$$

## Jakobian

$$\frac{\partial(x_1, x_2)}{\partial(y_1, y_2)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial y_1} & \frac{\partial x_1}{\partial y_2} \\ \frac{\partial x_2}{\partial y_1} & \frac{\partial x_2}{\partial y_2} \end{vmatrix} = (-) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y_1^2}{2}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y_2^2}{2}\right)$$

$$f_Y(y_1, y_2) dy_1 dy_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y_1^2}{2}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y_2^2}{2}\right) dy_1 dy_2 = f_{Y_1}(y_1) f_{Y_2}(y_2) dy_1 dy_2$$

rozkład normalny dla dwóch niezależnych zmiennych losowych

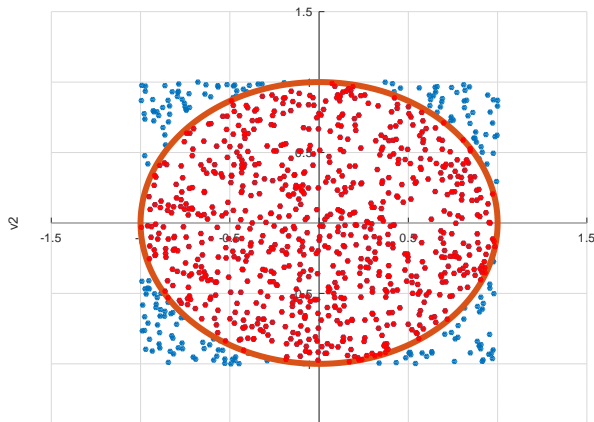
$$f_{Y_1}(y_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y_1^2}{2}\right) = N(0, 1)$$

# Algorytm

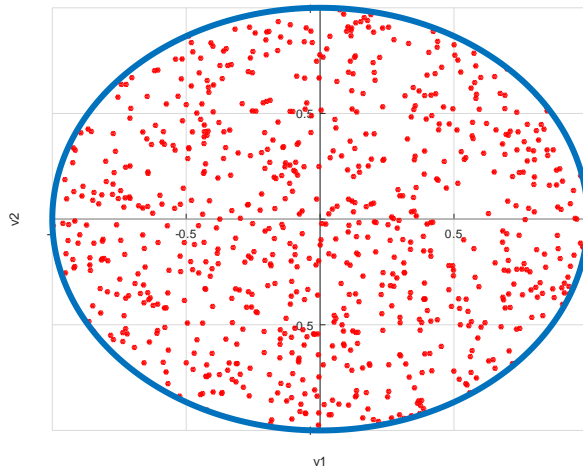
- $x_1, x_2$  - losowane z rozkładu jednorodnego na przedziale  $(0,1)$
- $y_1 = \sqrt{-2 \ln(x_1)} \cos(2\pi x_2)$   
 $y_2 = \sqrt{-2 \ln(x_1)} \sin(2\pi x_2)$
- $Y_1 \sim N(0, 1), Y_2 \sim N(0, 1)$
- Jeśli  $Y \sim N(0, 1)$  i  $Z \sim N(\mu, \sigma^2)$ , to  $z = \sigma y + \mu$

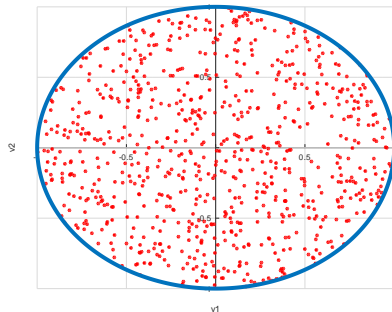
# Metoda Polarna

$v_1, v_2$  z rozkładu jednorodnego  $(-1,1)$   
są najpierw losowane w okręgu:



chcemy wziąć tylko te, które są w środku:





Nowe zmienne losowe:

$$R^2 = v_1^2 + v_2^2 \quad \text{rozkład jednorodny } (0,1)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{v_1}{v_2}\right) \quad \text{rozkład jednorodny } (0, 2\pi)$$

# Metoda polarna

$$\begin{aligned}y_1 &= \sqrt{-2 \ln(x_1)} \cos(2\pi x_2) \\y_2 &= \sqrt{-2 \ln(x_1)} \sin(2\pi x_2)\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}y_1 &= \sqrt{-2 \ln(R^2)} \overbrace{\cos(\theta)}^{v_1/R} \\y_2 &= \sqrt{-2 \ln(R^2)} \underbrace{\sin(\theta)}_{v_2/R}\end{aligned}$$



$y_1, y_2$  - rozkład normalny  $N(0, 1)$

$$\begin{aligned}y_1 &= \sqrt{-2 \ln(R^2)} \frac{v_1}{R} \\y_2 &= \sqrt{-2 \ln(R^2)} \frac{v_2}{R}\end{aligned}$$

# Metoda odwracania dystrybuanty

## Dystrybuanta

$$F_X(x) = P(X \leq x)$$

$$f_X(x) = \frac{d}{dx} F_X(x)$$

Chcemy dobrać taką funkcję (transformację zmiennej losowej)  $g(x)$ , żeby  $y = g(x)$  - nowa zmienna losowa z zadanej  $f_Y(y)$



Zakładamy, że  $X$  - z rozkładu jednostajnego:

$$f_X(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & x < 0 \text{ or } x > 1 \end{cases}$$

$$F_X(x) = x$$

Niechaj

$$X = F_Y(y) \rightarrow Y = F_Y^{-1}(X)$$

Wtedy

$$\begin{aligned} F_X(x) &= P(X \leq x) = P(F_Y(y) \leq x) = \\ &= P(Y \leq F_Y^{-1}(X)) = F_Y(F_Y^{-1}(X)) = X \end{aligned}$$

# Metoda odwracania dystrybucji

Czyli  $X$  jest z rozkładu jednorodnego.

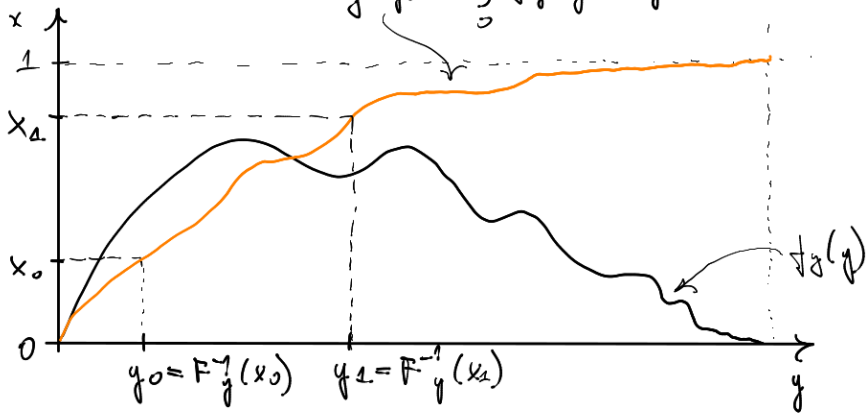
$$F_X(x) = x$$

Znaczący jeśli  $X$  jest z rozkładu jednorodnego i  $Y$  jest z rozkładu znanej dystrybucji, to można zrobić transformację:

$$Y = F_Y^{-1}(X)$$

Interpretacja geometryczna:

$$F_Y(y) = \int_0^y f_Y(y) dy$$



## Problem A1

- Implementacja generatoru liczb losowych z rozkładu normalnego  $N(\mu, \sigma^2)$  metodą polarną  
 $\mu = 0$  - wartość oczekiwania;  
 $\sigma^2 = 1$  - wariancja;
- Narysowanie histogramu i porównanie ze wzorem analitycznym

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

- Obliczyć eksperymentalne wartości średniej oraz wariancji

## Problem A2

- Implementacja generatoru liczb losowych z rozkładu Cauchy'ego  $C(y_0, \gamma)$ , metodą odwróconej dystrybucyjności FGP:

$$f(y) = \frac{1}{\pi\gamma \left[1 + \left(\frac{y-y_0}{\gamma}\right)^2\right]}, \quad y \in (-\infty, \infty)$$

- Narysowanie histogramu i porównanie ze wzorem analitycznym dla różnych wartości  $y_0$  i  $\gamma$
- Obliczyć eksperymentalne wartości średniej oraz wariancji

## Problem ruiny gracza

Gracz A                      początkowy kapitał  $a$  ( $a \in \mathbb{Z}$ )

Gracz B                      początkowy kapitał  $b$  ( $b \in \mathbb{Z}$ )

$$z = a + b$$

Pod czas każdej rozgrywki gracz A może wygrać jednostkę kapitału u gracza B, lub na odwrót.

A wygrywa 1              prawdopodobieństwo  $p$

B wygrywa 1              prawdopodobieństwo  $q = 1 - p$

$Q_i$  - zdarzenie ruiny A przy kapitale początkowym  $i$

$\bar{M}$  - zdarzenie wygrana gracza A w pierwszej kolejce

Prawdopodobieństwo całkowite:

$$P(Q_i) = P(Q_i|M)P(M) + P(Q_i|\bar{M})P(\bar{M})$$

$$r_i \equiv P(Q_i)$$

$r_i$  - prawdopodobieństwo ruiny gracza A  
przy kapitale początkowym  $i$

$$P(Q_i|M) = P(Q_{i+1}) = r_{i+1}$$

$$P(Q_i|\bar{M}) = P(Q_{i-1}) = r_{i-1}$$

$$r_i = r_{i+1}p + r_{i-1}q$$

$$r_0 = 1; \quad r_z = 0$$

$$r_i = r_{i+1}p + r_{i-1}q$$

$$r_i(\overbrace{p+q}^1) = r_{i+1}p + r_{i-1}q$$

$$q(r_i - r_{i-1}) = p(r_{i+1} - r_i)$$

$$\frac{q}{p} = \frac{r_{i+1} - r_i}{r_i - r_{i-1}}$$

$$\Delta_i \equiv r_i - r_{i-1}$$

$$\frac{q}{p} = \frac{\Delta_{i+1}}{\Delta_i}$$

$$\Delta_{i+1} = \Delta_i \frac{q}{p}$$

$$\frac{q}{p} = \text{const}$$

$\Delta_i$  - ciąg geometryczny



## Ciąg geometryczny

$$\Delta_{i+1} = \Delta_i \frac{q}{p}$$

## Suma n członków

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i = S_n = \Delta_1 \frac{1 - \left(\frac{q}{p}\right)^n}{1 - \frac{q}{p}}$$

$$S_n = \underbrace{\Delta_1}_{r_1 - r_0} + \underbrace{\Delta_2}_{r_2 - r_1} + \underbrace{\Delta_3}_{r_3 - r_2} + \dots + \underbrace{\Delta_n}_{r_n - r_{n-1}} = r_n - r_0 = r_n - 1$$

$$\begin{cases} S_n = \Delta_1 \frac{1 - \left(\frac{q}{p}\right)^n}{1 - \frac{q}{p}} = r_n - 1 \\ S_z = \Delta_1 \frac{1 - \left(\frac{q}{p}\right)^z}{1 - \frac{q}{p}} = r_z - 1 = -1 \end{cases}$$

$$-(r_n - 1) = \frac{1 - \left(\frac{q}{p}\right)^n}{1 - \left(\frac{q}{p}\right)^z}$$

$$p \neq q \neq 0.5$$

$$r_n = \frac{\left(\frac{q}{p}\right)^n - \left(\frac{q}{p}\right)^z}{1 - \left(\frac{q}{p}\right)^z} \quad (1)$$

$$p = q = 0.5 \quad \rightarrow \quad \frac{q}{p} = 1$$

$$r_n = \frac{\left(\frac{q}{p}\right)^n - \left(\frac{q}{p}\right)^z}{1 - \left(\frac{q}{p}\right)^z} = \frac{1^n - 1^z}{1 - 1^z} = \frac{0}{0}$$

## Reguła de l'Hospitala

Jeżeli  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) \rightarrow 0$  i  $\lim_{x \rightarrow a} g(x) \rightarrow 0$  oraz istnieją (skończone) pochodne  $f'(a)$  i  $g'(a)$ , przy czym  $g'(a) \neq 0$ , to

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow a} \frac{f'(x)}{g'(x)}$$

$$x \equiv \frac{q}{p} \rightarrow 1$$

$$\begin{aligned} r_n &= \lim_{x \rightarrow 1} \frac{x^n - x^z}{1 - x^z} = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{(x^n - x^z)'}{(1 - x^z)'} = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{nx^{n-1} - zx^{z-1}}{-zx^{z-1}} = \\ &= \lim_{x \rightarrow 1} \frac{x^{z-1}(nx^{n-z} - z)}{-zx^{z-1}} = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{nx^{n-z} - z}{-z} = \frac{n - z}{-z} = 1 - \frac{n}{z} \end{aligned}$$

$p=q=0.5$

$$r_n = 1 - \frac{n}{z} \quad (2)$$

# Jakie prawdopodobieństwo, że gra się zakończy (ktoś przegra)?

$$r_a^A = 1 - \frac{a}{z}$$

prawdopodobieństwo, że gracz A  
przegra

$$r_b^B \rightarrow \left[ r_b^A : \begin{array}{l} q \rightarrow p \\ p \rightarrow q \end{array} \right] = 1 - \frac{b}{z}$$

**p=q=0.5**

$$r_a^A + r_b^B = \left( 1 - \frac{a}{a+b} \right) + \left( 1 - \frac{b}{a+b} \right) = \frac{b+a}{a+b} = 1$$

# Jakie prawdopodobieństwo, że gra się zakończy (ktoś przegra)?

$p \neq q \neq 0.5$

$$r_a^A = \frac{\left(\frac{q}{p}\right)^a - \left(\frac{q}{p}\right)^z}{1 - \left(\frac{q}{p}\right)^z}$$

$$r_b^B = \frac{\left(\frac{p}{q}\right)^b - \left(\frac{p}{q}\right)^z}{1 - \left(\frac{p}{q}\right)^z} = \frac{\left(\frac{q}{p}\right)^{-b} - \left(\frac{q}{p}\right)^{-z}}{1 - \left(\frac{q}{p}\right)^{-z}} = \frac{\left(\frac{q}{p}\right)^{z-b} - 1}{\left(\frac{q}{p}\right)^z - 1} = \frac{1 - \left(\frac{q}{p}\right)^a}{1 - \left(\frac{q}{p}\right)^z}$$

$$r_a^A + r_b^B = \frac{\left(\frac{q}{p}\right)^a - \left(\frac{q}{p}\right)^z}{1 - \left(\frac{q}{p}\right)^z} + \frac{1 - \left(\frac{q}{p}\right)^a}{1 - \left(\frac{q}{p}\right)^z} = 1$$

Gra się zawsze zakończy

## Problem:

A ma  $\infty$  kapital, B ma kapital  $b$ ,  $P(A_{\text{wygrywa}})$  - ?

$p=q=0.5$

$$\begin{aligned} P(A_{\text{wygrywa}}) &= P(B_{\text{bankrutuje}}) = \lim_{a \rightarrow \infty} r_b^B = \lim_{a \rightarrow \infty} \left( 1 - \frac{b}{a+b} \right) = \\ &= \lim_{a \rightarrow \infty} \frac{a}{a+b} = \lim_{a \rightarrow \infty} \frac{1}{1+b/a} = 1 \end{aligned}$$

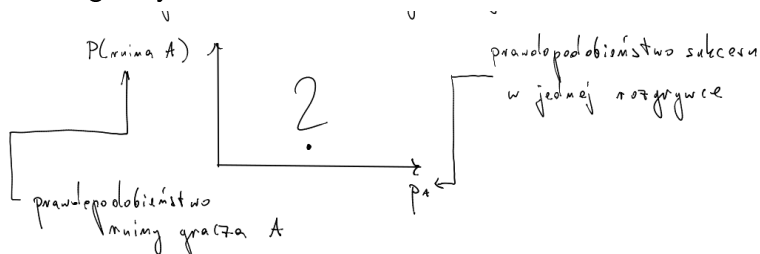
$p \neq q \neq 0.5$

$$P(A_{\text{wygrywa}}) = \lim_{a \rightarrow \infty} r_b^B = \lim_{a \rightarrow \infty} \frac{1 - \left(\frac{q}{p}\right)^a}{1 - \left(\frac{q}{p}\right)^{a+b}} = \begin{cases} 1; & q < p \\ \left(\frac{p}{q}\right)^b; & q > p \end{cases}$$

## Problem B (obowiązkowe)

Symulacja  $N$  gier z różnymi wartościami  $p_A$ . Dla każdej wartości  $p_A$  obliczyć prawdopodobieństwo ruiny gracza A.

- Ruina gracza dla 2 graczy A,B



Kapitały początkowe A,B:

$$a = 50; b = 50$$

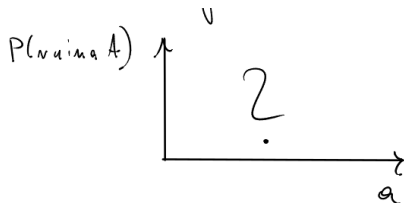
- Porównanie z wynikiem analitycznym dla różnych  $a, b$



## Problem C (obowiązkowe)

Symulacja  $N$  gier z różnymi wartościami  $a$ . Dla każdej wartości obliczyć prawdopodobieństwo ruiny gracza A.

- Ruina gracza dla 2 graczy A, B



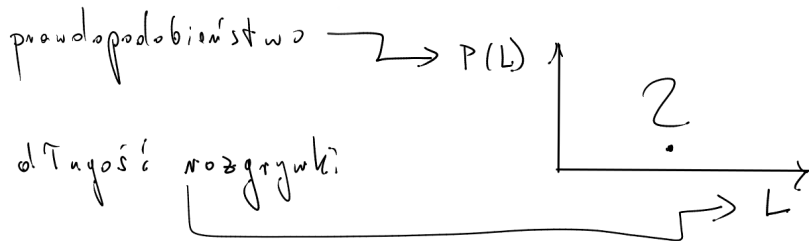
$$a+b=100;$$
$$p_A = \frac{1}{2}, \dots$$

- Porównanie wyniku z teorią

## Problem D (obowiązkowe)

Symulacja N gier, dla każdej gry obliczyć ilość rozgrywek.

- Liczba rozgrywek do ukończenia gry -  $L$



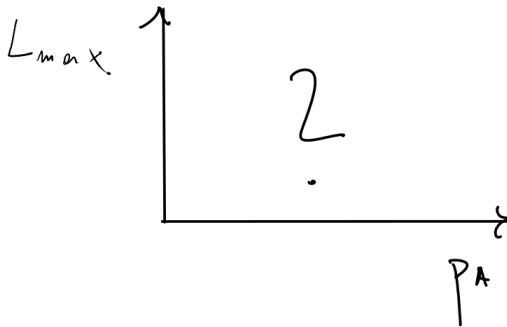
$$p_A = \frac{1}{2}, \frac{1}{5}, \frac{4}{5}; \quad a = b = 50; \quad \text{całkowita liczba gier} = 20000$$

- Wyliczyć średnią długość rozgrywki

## Problem E (obowiązkowe)

Symulacja  $N$  gier z różnymi wartościami  $p_A$ . Dla każdej wartości  $p_A$  obliczyć maksymalną ilość rozgrywek.

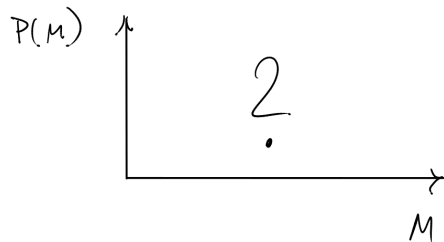
- Histogram maksymalną długości rozgrywek przy 1000 rozgrywkach -  $L_{max}$



$p_A$  - prawdopodobieństwo wygrania kolejki przez A

## Problem F (Nie obowiązkowe)

Prawdopodobieństwo że gracz **A** ma kapitał **M** po **n** rozgrywkach



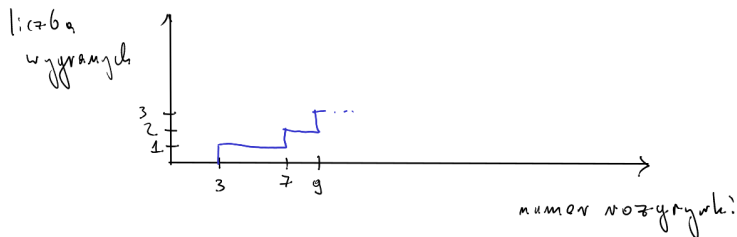
$$n = 2, 10, 20, \dots, 100;$$

$$a=b=50;$$

$$p_A = \frac{1}{2}, \frac{1}{5}$$

## Problem G (obowiązkowe)

- Trajektoria liczby wygranych dla 1 z 2 graczy



dla kilku gier (do 10)

dla różnych wartości  $p_A$ :  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{5}$ ,  $\frac{4}{5}$

- Trajektoria kapitału dla 1 z 2 graczy

## Problem H (*obowiązkowe cięściowo*)

- B, C, D, G dla kilku, np. pięciu, graczy  
(w G teraz trajektorie dla wszystkich graczy)

różne kombinacje  $p_i$  (prawdopodobieństwo wygrania gracza "i" w kolejce)  
 $a_i = 20$  - kapitały początkowe gracz (lub spróbować inne wartości).