

# Przyczynowe więzy na strukturę korelacji w formalizmie kwantowym

Politechnika Gdańska  
Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej

10 kwietnia 2017

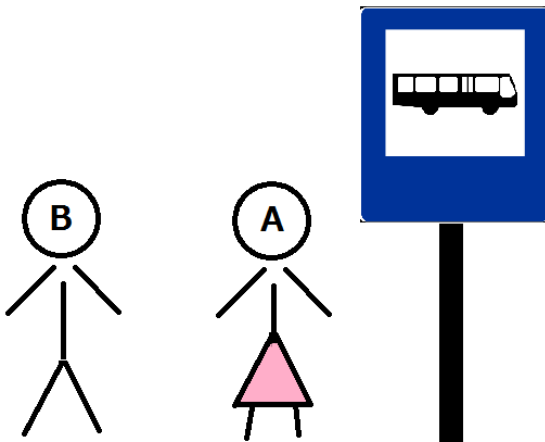
# Zarys

- 1 Porządek przyczynowy
  - Klasyczny porządek przyczynowy
  - Brak porządku przyczynowego
- 2 Macierz procesu
  - Macierz procesu
  - Klasyczne elementy
  - Kwantowy przełącznik
  - Gry przyczynowe
  - Świadek przyczynowości

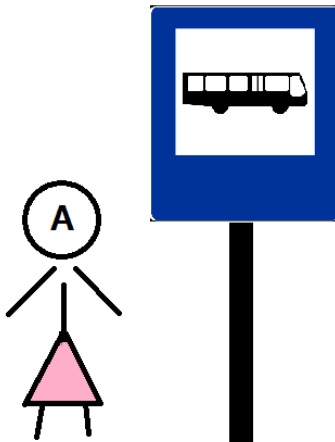
# Zarys

- 1 Porządek przyczynowy
  - Klasyczny porządek przyczynowy
  - Brak porządku przyczynowego
- 2 Macierz procesu
  - Macierz procesu
  - Klasyczne elementy
  - Kwantowy przełącznik
  - Gry przyczynowe
  - Świadek przyczynowości

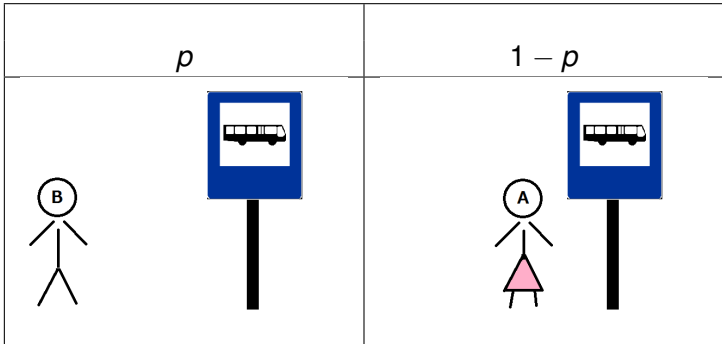
## Wydarzenia uporządkowane przyczynowo $t_1$ .



## Wydarzenia uporządkowane przyczynowo $t_2$ .



## Wydarzenia uporządkowane przyczynowo $t_2$ .



Porządek przyczynowy  
Macierz procesu

Klasyczny porządek przyczynowy  
Brak porządku przyczynowego

## Wydarzenia uporządkowane przyczynowo $t_3$ .

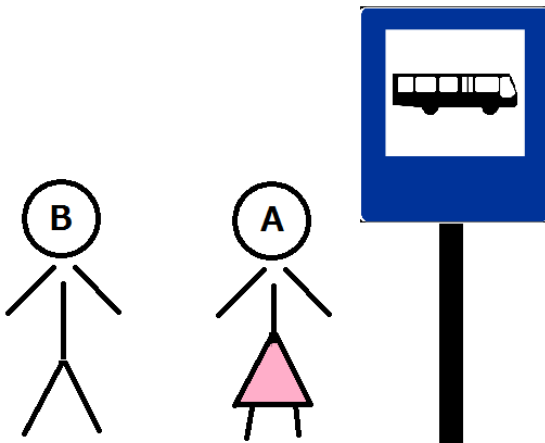


# Zarys

- 1 Porządek przyczynowy
  - Klasyczny porządek przyczynowy
  - Brak porządku przyczynowego
- 2 Macierz procesu
  - Macierz procesu
  - Klasyczne elementy
  - Kwantowy przełącznik
  - Gry przyczynowe
  - Świadek przyczynowości



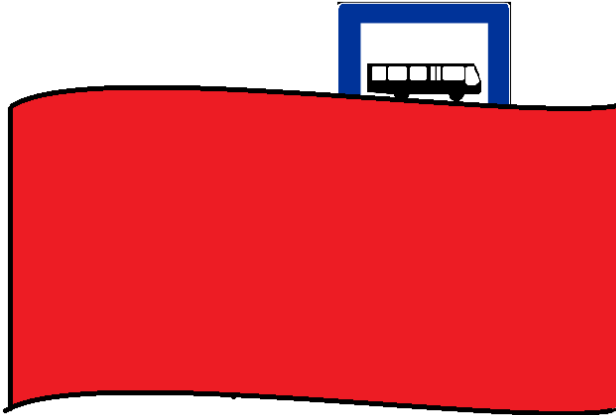
## Porządek generowany przez macierze procesu $t_P$ .



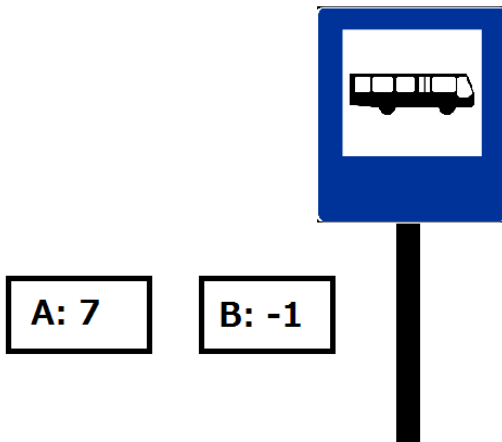
Porządek przyczynowy  
Macierz procesu

Klasyczny porządek przyczynowy  
Brak porządku przyczynowego

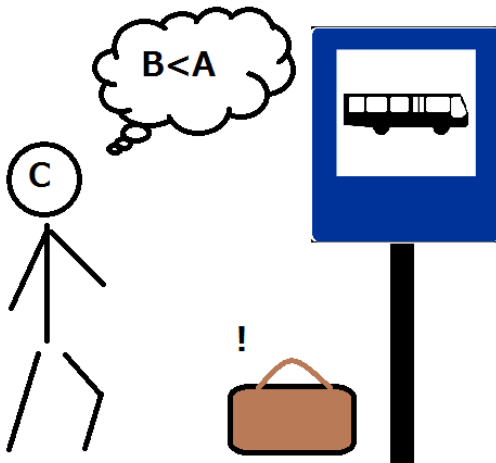
Porządek generowany przez macierze procesu  $t_W$ .



## Porządek generowany przez macierze procesu $t_F$ .



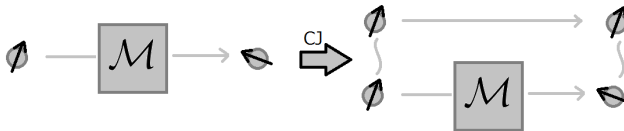
## Porządek generowany przez macierze procesu $t_F$ .



# Zarys

- 1 Porządek przyczynowy
  - Klasyczny porządek przyczynowy
  - Brak porządku przyczynowego
- 2 Macierz procesu
  - Macierz procesu
  - Klasyczne elementy
  - Kwantowy przełącznik
  - Gry przyczynowe
  - Świadek przyczynowości

# Izomorfizm CJ



$$\mathfrak{c}(\mathcal{M}_\gamma) = \left[ \sum_{ij} |i\rangle\langle i| \otimes \mathcal{M}_\gamma (|i\rangle\langle j|) \right]^T \quad (1)$$

$$|A\rangle\rangle = \sum_i (|i\rangle \otimes A|i\rangle) \quad (2)$$

# Warunki na macierz procesu

$$W \in \mathcal{L}(\mathcal{H}^{A_1} \otimes \mathcal{H}^{A_2} \otimes \mathcal{H}^{B_1} \otimes \mathcal{H}^{B_2}) \quad (3)$$

$$W \geq 0 \quad (4)$$

$$\text{Tr } W = d_{A_2 B_2} \quad (5)$$

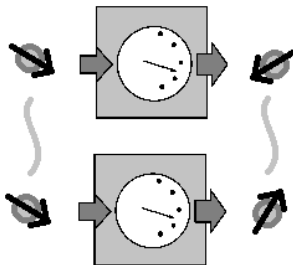
$$\text{Pr}(i, j) = \text{Tr} [W (M_i \otimes M_j)] \quad (6)$$

# Zarys

- 1 Porządek przyczynowy
  - Klasyczny porządek przyczynowy
  - Brak porządku przyczynowego
- 2 **Macierz procesu**
  - Macierz procesu
  - **Klasyczne elementy**
  - Kwantowy przełącznik
  - Gry przyczynowe
  - Świadek przyczynowości

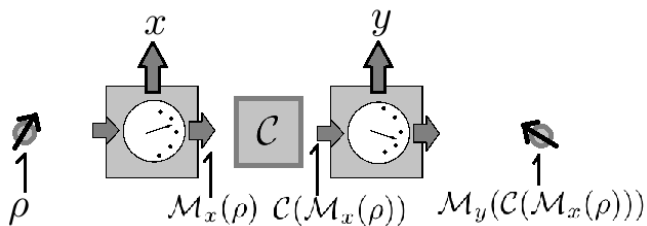


# Stany



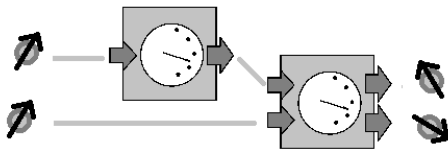
$$W = \rho^{A_1 B_1} \otimes \mathbb{1}^{A_2 B_2} \quad (7)$$

# Kanały



$$W = \rho^{A_1} \otimes C^{A_2 B_1} \otimes \mathbb{1}^{B_2} \quad (8)$$

# Kanały z pamięcią

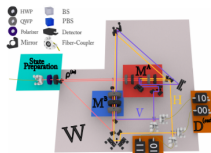


Wyrazy typu  $A_1A_2B_1$ ,  $B_1B_2A_1$ .

# Zarys

- 1 Porządek przyczynowy
  - Klasyczny porządek przyczynowy
  - Brak porządku przyczynowego
- 2 **Macierz procesu**
  - Macierz procesu
  - Klasyczne elementy
  - **Kwantowy przełącznik**
  - Gry przyczynowe
  - Świadek przyczynowości

## Ważny przykład



Rysunek: Ilustracja kwantowego przełącznika, źródło: [1]

$$\begin{aligned}
 |w\rangle = & |\psi\rangle^{A_1} |\mathbb{1}\rangle^{A_2 B_1} |B_2 C_{1t}\rangle |0\rangle^{C_c} \\
 & + |\psi\rangle^{B_1} |\mathbb{1}\rangle^{B_2 A_1} |\mathbb{1}\rangle^{A_2 C_{1t}} |1\rangle^{C_c}
 \end{aligned} \tag{9}$$

# Zarys

- 1 Porządek przyczynowy
  - Klasyczny porządek przyczynowy
  - Brak porządku przyczynowego
- 2 **Macierz procesu**
  - Macierz procesu
  - Klasyczne elementy
  - Kwantowy przełącznik
  - **Gry przyczynowe**
  - Świadek przyczynowości

# Łamanie nierówności przyczynowych

$$\frac{1}{4} \left[ 1111 + \frac{1}{\sqrt{2}} (1ZZ1 + Z1XZ) \right] \quad (10)$$

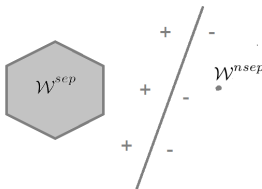
$$\Pr_{sukces} \geq \frac{3}{4} \quad (11)$$

# Zarys

- 1 Porządek przyczynowy
  - Klasyczny porządek przyczynowy
  - Brak porządku przyczynowego
- 2 Macierz procesu
  - Macierz procesu
  - Klasyczne elementy
  - Kwantowy przełącznik
  - Gry przyczynowe
  - Świadek przyczynowości



# Świadek przyczynowości



$$\text{Tr} [W^{\text{sep}} S] \geq 0 \quad (12)$$

$$\min \text{Tr} [WS] \quad (13)$$

$$\text{tak, aby } S \in \mathcal{S}_{\mathcal{V}}, \frac{\mathbb{1}}{d_O} - S \in \mathcal{W}_{\mathcal{V}}^*, \quad (14)$$



Giulia Rubino, Lee A. Rozema, Adrien Feix, Mateus Araújo,  
Jonas M. Zeuner, Lorenzo M. Procopio, Časlav Brukner,  
and Philip Walther.

Experimental verification of an indefinite causal order,  
2016.