

Kataliza w transformacji kwantowych stanów w zastosowaniu do silników cieplnych

Marcin Łobejko, Tanmoy Biswas, Paweł Mazurek,
Michał Horodecki

Phys. Rev. Lett. 132, 260403

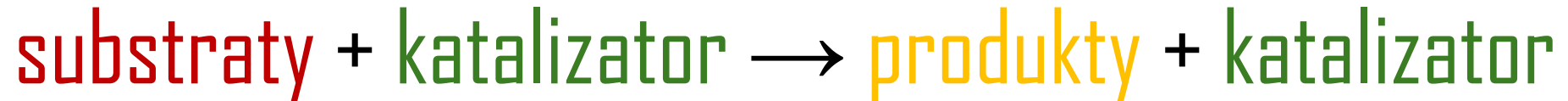
Phys. Rev. E 110, 044120



**Uniwersytet
Gdański**



Kataliza w chemii



Kataliza w kwantowej teorii informacji

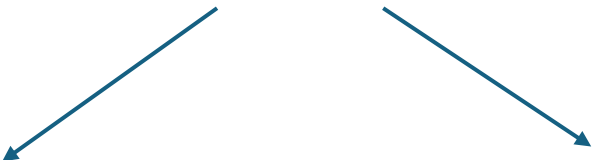
$$\rho \otimes \sigma \rightarrow \eta \otimes \sigma$$

Silna wersja katalizy

$$\rho \otimes \sigma \rightarrow \eta \otimes \sigma$$

Słabsza wersja katalizy

$$\rho \otimes \sigma \rightarrow \xi$$



$$\mathrm{Tr}_B[\xi] = \eta \quad \mathrm{Tr}_A[\xi] = \sigma$$

Silnik cieplny dwusuwowy

Krok I (praca):

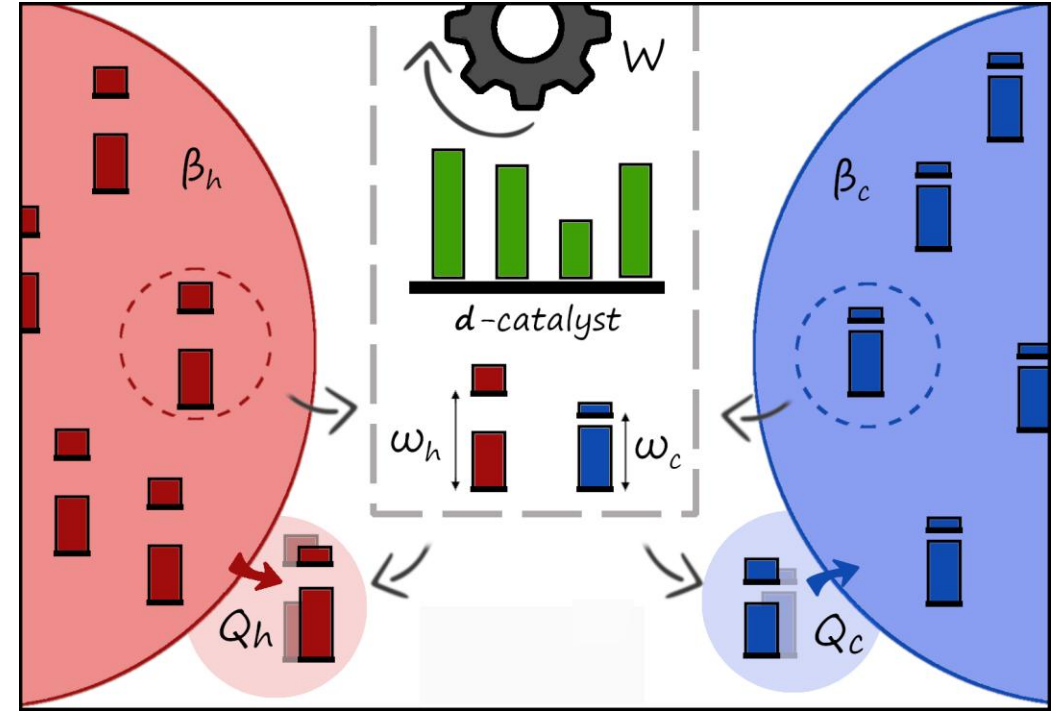
$$\rho_h \otimes \rho_c \xrightarrow{W} U \rho_h \otimes \rho_c U^\dagger$$

$$W = \text{Tr}[(H_h + H_c)(\rho_h \otimes \rho_c - U \rho_h \otimes \rho_c U^\dagger)]$$

Krok II (termalizacja):

$$U \rho_h \otimes \rho_c U^\dagger \xrightarrow{Q_h, Q_c} \rho_h \otimes \rho_c$$

$$Q_{h,c} = \text{Tr}[H_{h,c}(\rho_h \otimes \rho_c - U \rho_h \otimes \rho_c U^\dagger)]$$



Stan początkowy

$$\rho_h \otimes \rho_c = \frac{e^{-\beta_h H_h}}{\text{Tr}[e^{-\beta_h H_h}]} \otimes \frac{e^{-\beta_c H_c}}{\text{Tr}[e^{-\beta_c H_c}]}$$

Cykl termodynamiczny

$$\rho_h \otimes \rho_c \xrightarrow{W} U \rho_h \otimes \rho_c U^\dagger \xrightarrow{Q_h, Q_c} \rho_h \otimes \rho_c$$

Pierwsze prawo

$$W = Q_h + Q_c$$

Drugie prawo

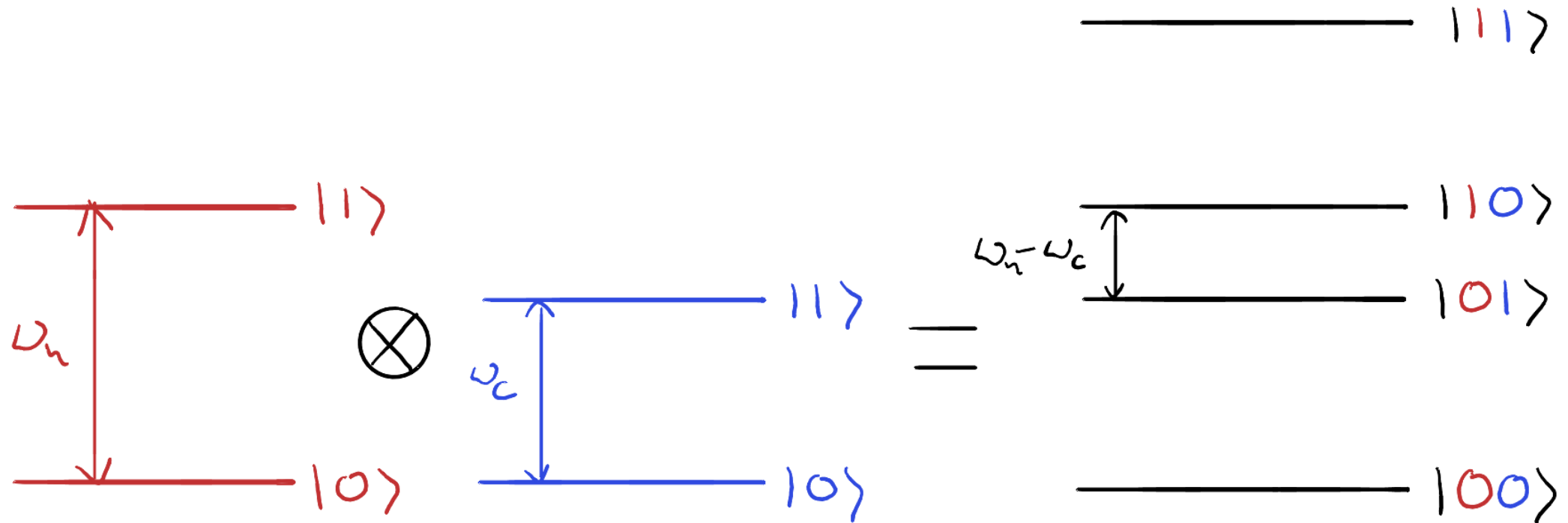
$$\beta_h Q_h + \beta_c Q_c \leq 0$$

Sprawność

$$\eta = \frac{W}{Q_h} = 1 + \frac{Q_c}{Q_h} \leq 1 - \frac{\beta_h}{\beta_c}$$

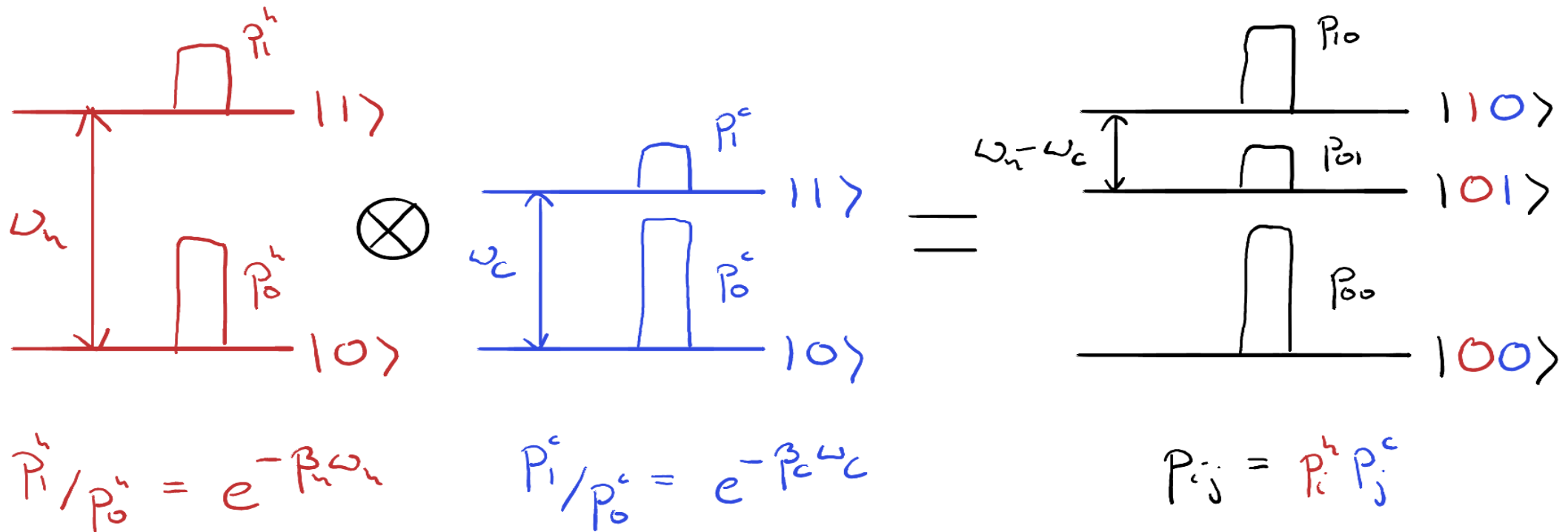
Przykład I: Dwusuwowy silnik Otto

Poziomy energetyczne



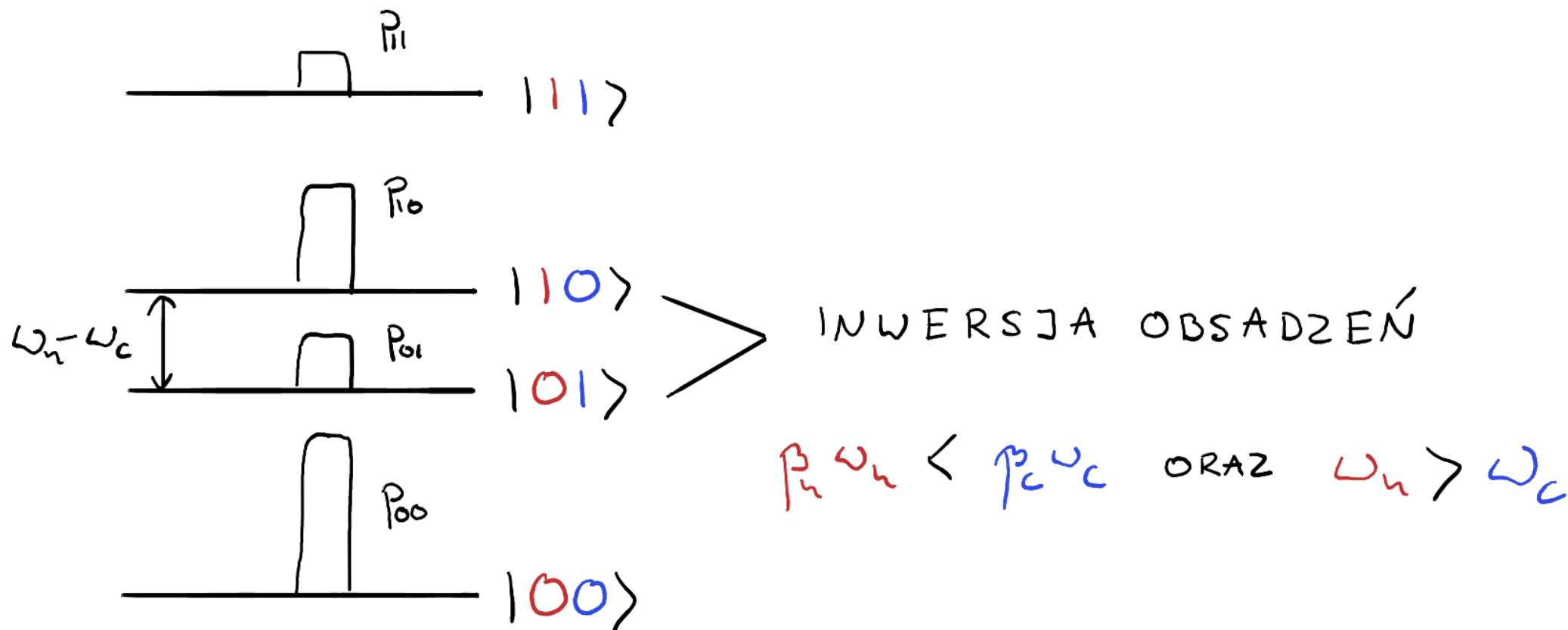
Przykład I: Dwusuwowy silnik Otto

Populacje termiczne



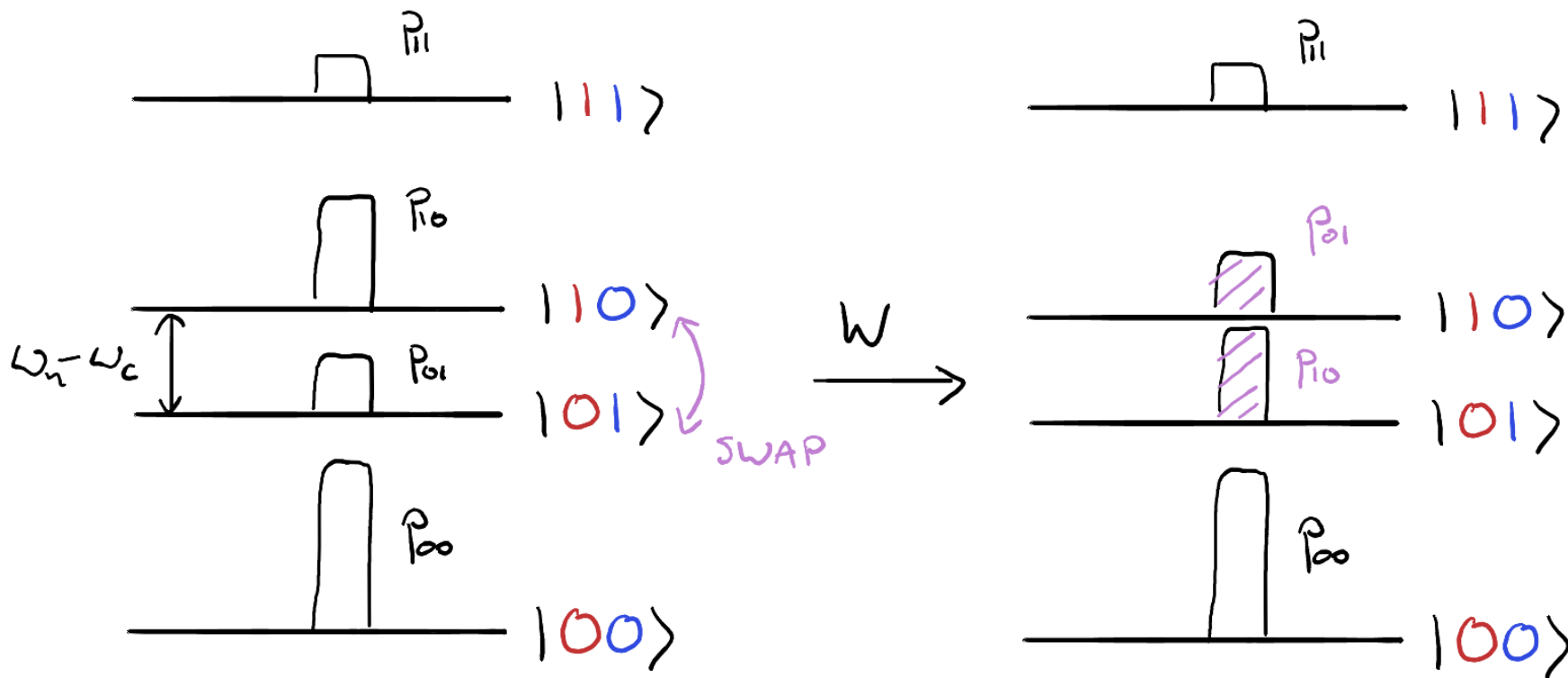
Aktywny stan nierównowagowy

Przykład I:
Dwusuwowy silnik Otto



Krok I: Praca

Przykład I: Dwusuwowy silnik Otto



$$W = (U_n - U_c) \delta p$$

$$\delta p = p_{10} - p_{01}$$

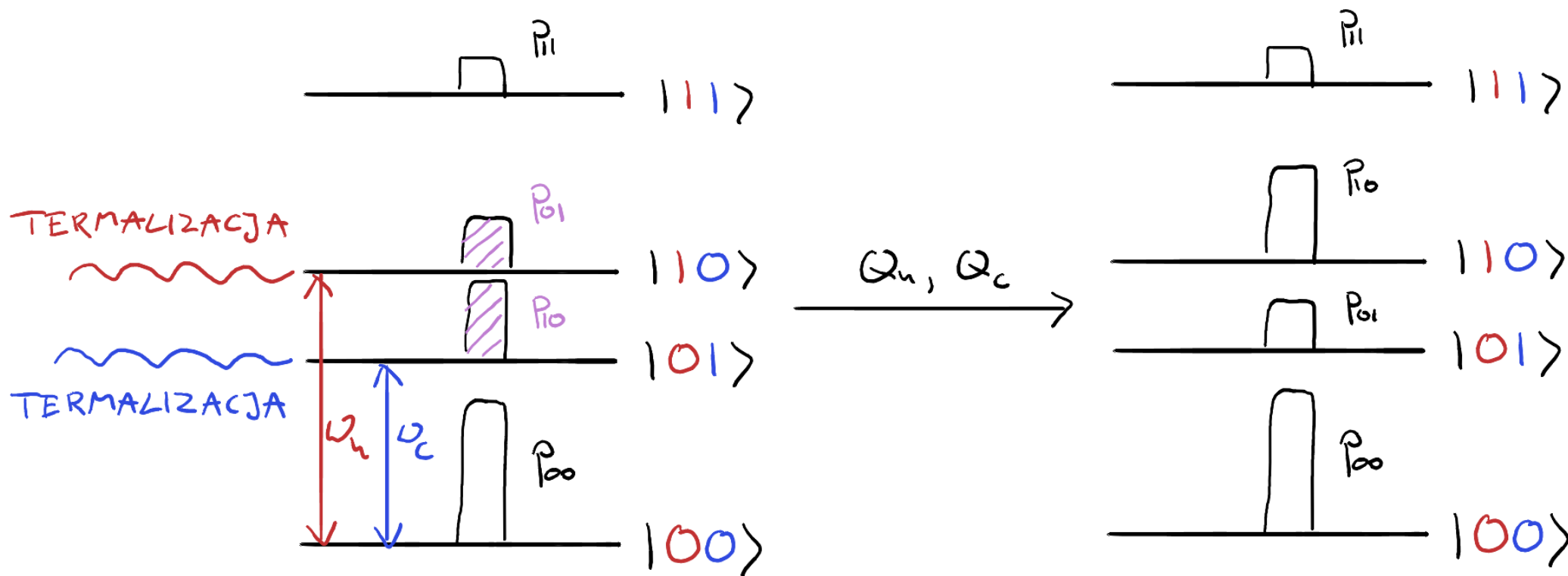
PROCES UNITARNY

(SWAP)

$$U = |00\rangle\langle 00| + |11\rangle\langle 11| + |10\rangle\langle 10| + |11\rangle\langle 01|$$

Krok II: Termalizacja

Przykład I: Dwusuwowy silnik Otto



$$Q_h = \omega_h \delta p \quad , \quad Q_c = -\omega_c \delta p$$

Podsumowanie

Przykład I: Dwusuwowy silnik Otto

Praca i ciepło:

$$W = (\omega_h - \omega_c)\delta p, \quad Q_h = \omega_h\delta p, \quad Q_c = -\omega_c\delta p$$

Sprawność Otto:

$$\eta = 1 + \frac{Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{\omega_c}{\omega_h}$$

$$\delta p = \frac{e^{-\beta_h\omega_h} - e^{-\beta_c\omega_c}}{(1 + e^{-\beta_h\omega_h})(1 + e^{-\beta_c\omega_c})}$$

Sprawność
optymalna!

Zakres pracy silnika:

$$W > 0 \iff \beta_h\omega_h < \beta_c\omega_c \quad \& \quad \omega_h > \omega_c$$

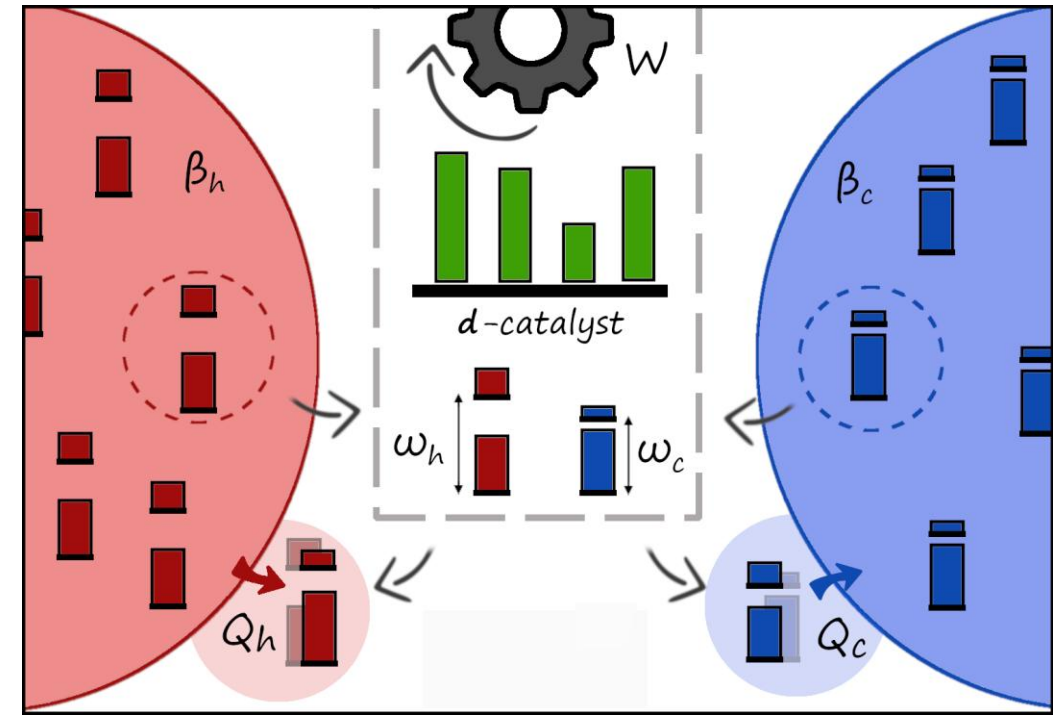
Silnik cieplny dwusuwowy z katalizatorem

Krok I (praca):

$$\rho_h \otimes \rho_c \otimes \sigma \xrightarrow{W} U \rho_h \otimes \rho_c \otimes \sigma U^\dagger \equiv \xi$$

Krok II (termalizacja):

$$U \rho_h \otimes \rho_c \otimes \sigma U^\dagger \xrightarrow{Q_h, Q_c} \rho_h \otimes \rho_c \otimes \text{Tr}_{hc}[\xi]$$



Stan początkowy

$$\rho_h \otimes \rho_c \otimes \sigma$$

Cykl termodynamiczny

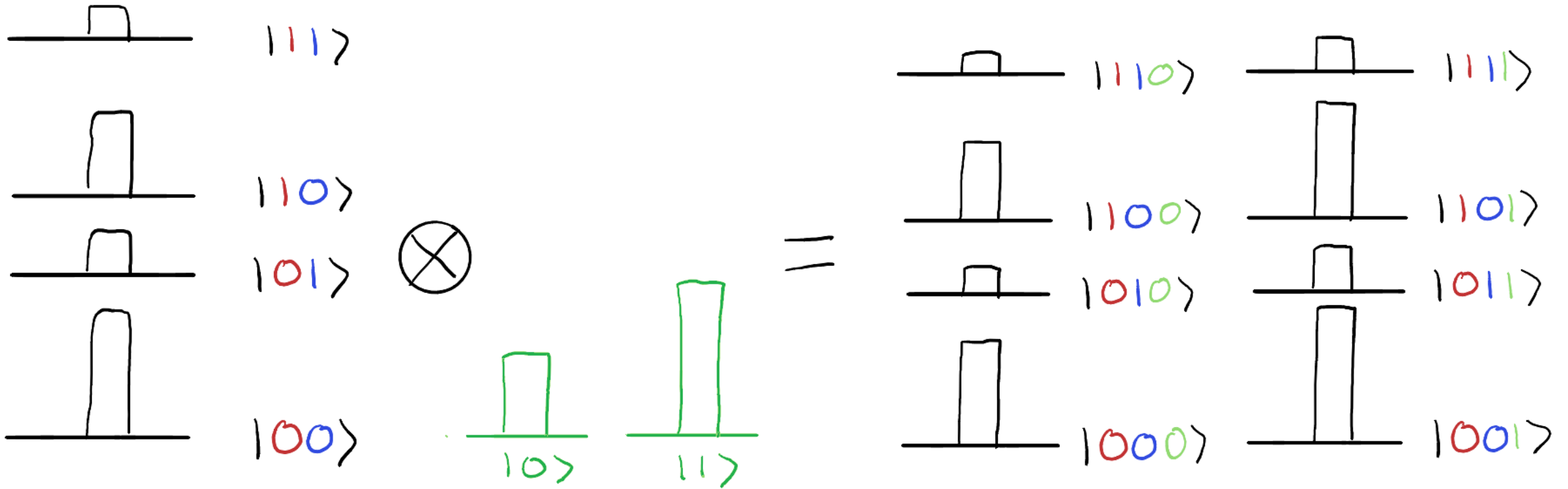
$$\rho_h \otimes \rho_c \otimes \sigma \xrightarrow{W} U \rho_h \otimes \rho_c \otimes \sigma U^\dagger \xrightarrow{Q_h, Q_c} \rho_h \otimes \rho_c \otimes \text{Tr}_{hc}[\xi]$$

Warunek katalizy:

$$\text{Tr}_{hc}[\xi] = \text{Tr}_{hc}[U \rho_h \otimes \rho_c \otimes \sigma U^\dagger] = \sigma$$

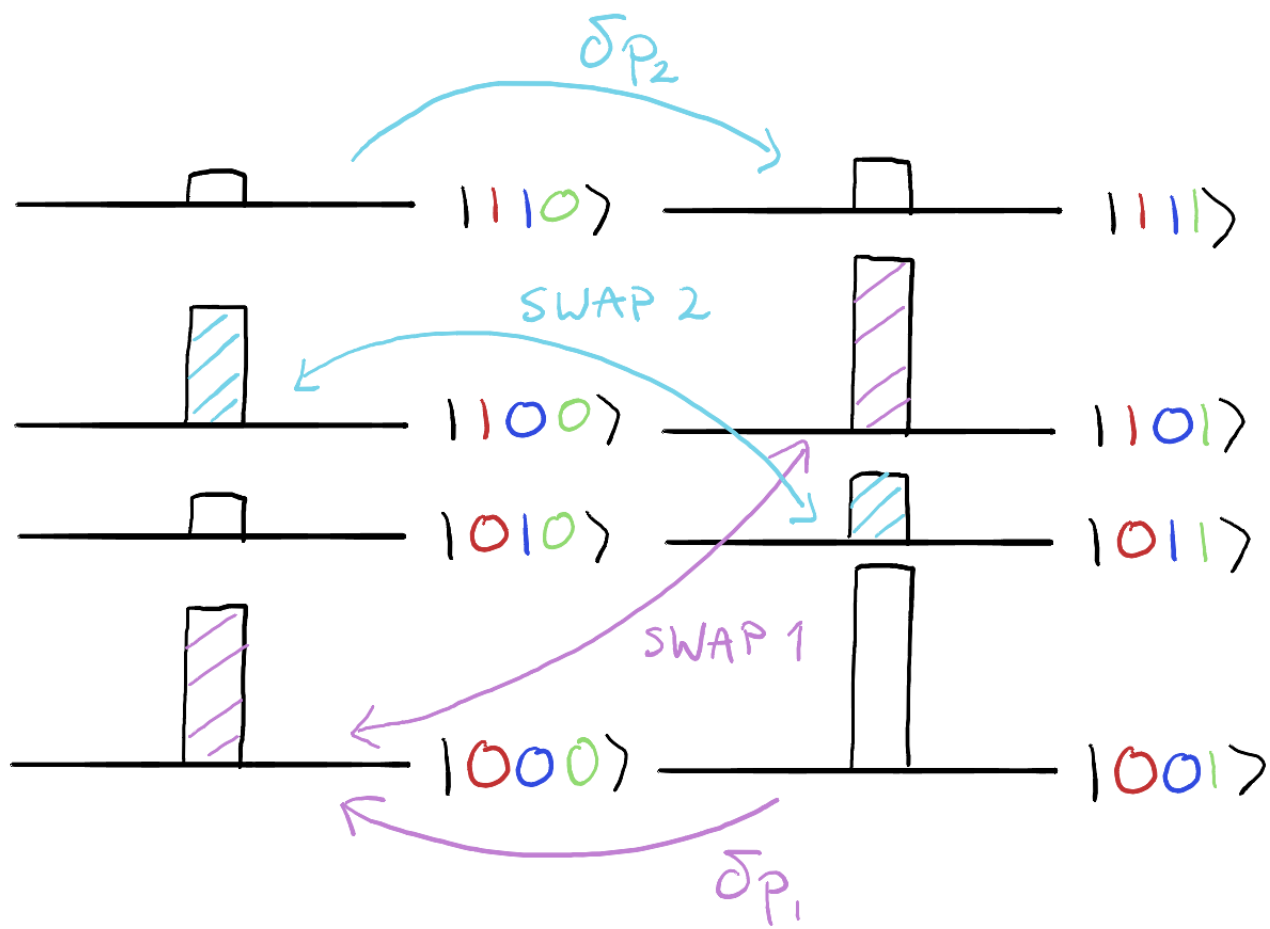
Poziomy energetyczne

Przykład II: Dwusuwowy silnik Otto z 2-katalizatorem



Rozłączne permutacje

Przykład II:
Dwusuwowy silnik Otto
z 2-katalizatorem



SWAP 1 : $Q_u = \omega_u \delta p_1$, $Q_c = 0$

SWAP 2 : $Q_u = \omega_u \delta p_2$, $Q_c = -\omega_c \delta p_2$

KATALIZA : $\delta p_1 = \delta p_2 \equiv \delta p$

Podsumowanie

Przykład II:
Dwusuwowy silnik Otto
z 2-katalizatorem

Praca i ciepło:

$$W = (2\omega_h - \omega_c)\delta p, \quad Q_h = 2\omega_h\delta p, \quad Q_c = -\omega_c\delta p$$

Sprawność Otto:

$$\eta = 1 + \frac{Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{\omega_c}{2\omega_h}$$

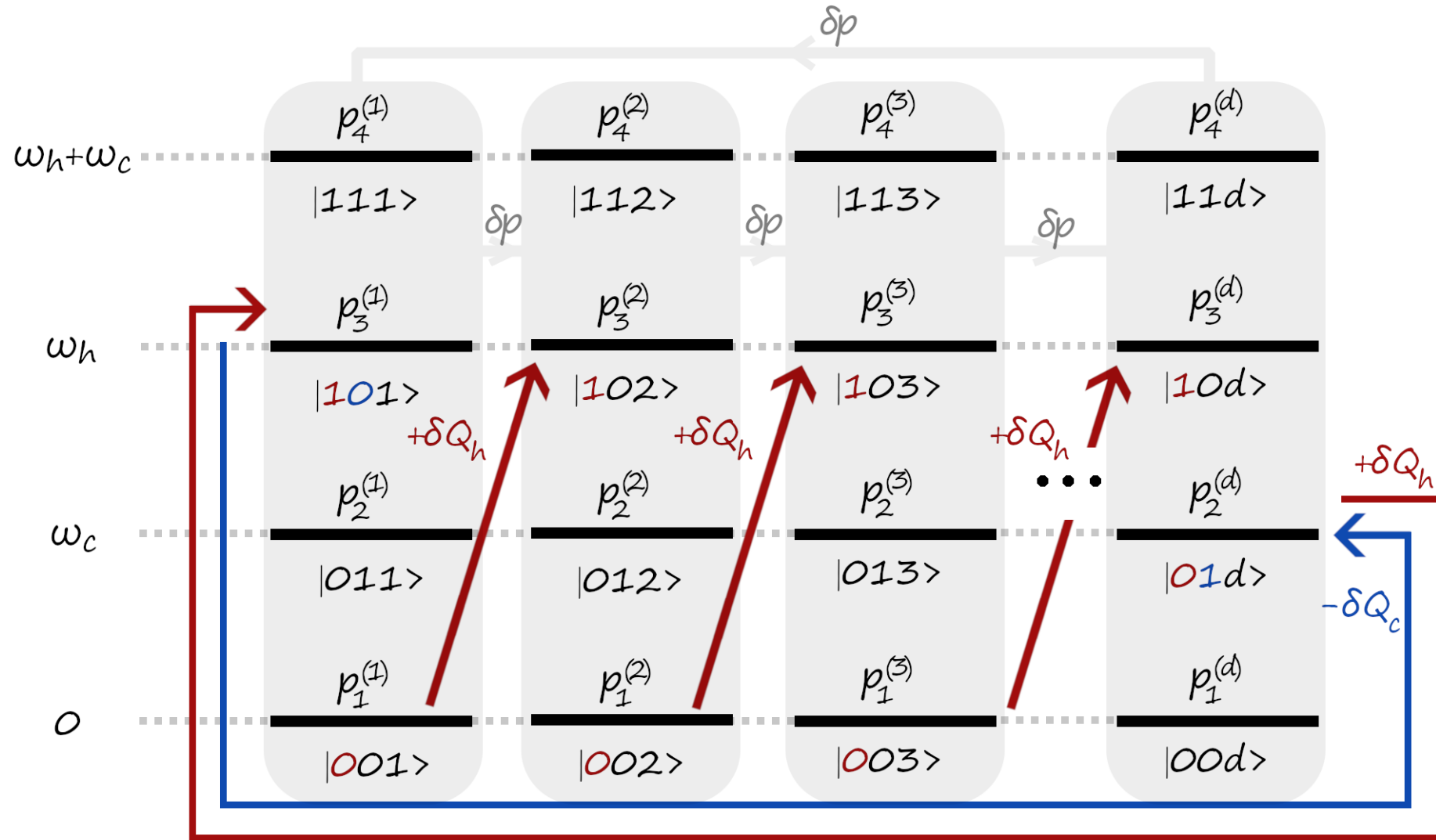
$$\delta p = \frac{e^{-2\beta_h\omega_h} - e^{-\beta_c\omega_c}}{(1 + e^{-\beta_h\omega_h})(1 + e^{-\beta_c\omega_c})} f_2$$

Warunek pracy silnika:

$$W > 0 \iff 2\beta_h\omega_h < \beta_c\omega_c \quad \& \quad 2\omega_h > \omega_c$$

d-katalizator

Przykład III: Dwusuwowy silnik Otto z d-katalizatorem



Podsumowanie

Przykład III:
Dwusuwowy silnik Otto
z d-katalizatorem

Praca i ciepło:

$$W = (d\omega_h - \omega_c)\delta p, \quad Q_h = d\omega_h\delta p, \quad Q_c = -\omega_c\delta p$$

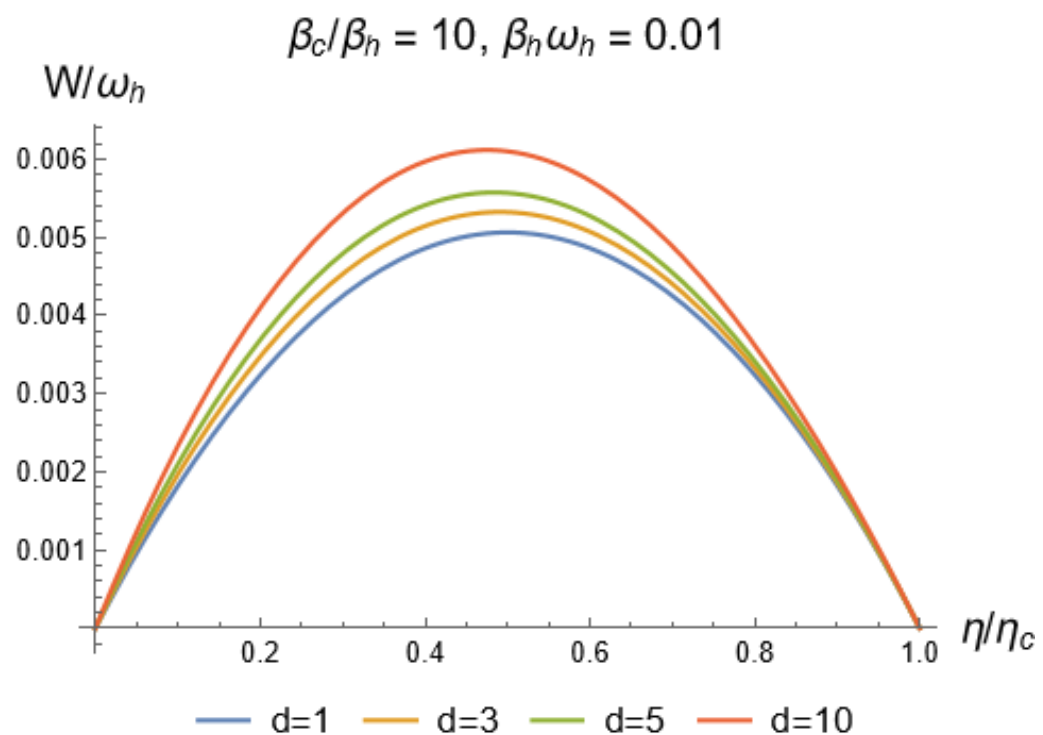
Sprawność Otto:

$$\eta = 1 + \frac{Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{\omega_c}{d\omega_h}$$
$$\delta p = \frac{e^{-d\beta_h\omega_h} - e^{-\beta_c\omega_c}}{(1 + e^{-\beta_h\omega_h})(1 + e^{-\beta_c\omega_c})} f_d$$

Warunek pracy silnika:

$$W > 0 \iff d\beta_h\omega_h < \beta_c\omega_c \quad \& \quad d\omega_h > \omega_c$$

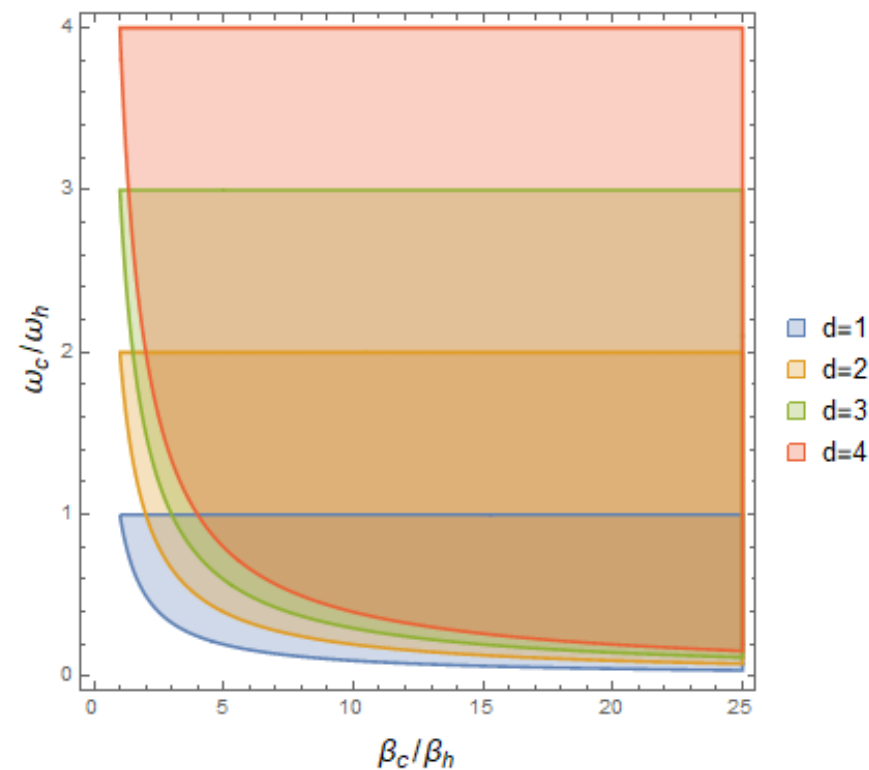
Absolutna katalityczna korzyść



praca vs. wydajność

$\eta \in [1 - \frac{\omega_c}{\omega_h}, 1 - \frac{\beta_h}{\beta_c})$

pełny zakres wydajności



zakres pracy silnika

Dziękuję za uwagę!



Tanmoy Biswas
Los Alamos National Laboratory



Paweł Mazurek
Uniwersytet Gdański



Michał Horodecki
Uniwersytet Gdański

Phys. Rev. Lett. 132, 260403
Phys. Rev. E 110, 044120