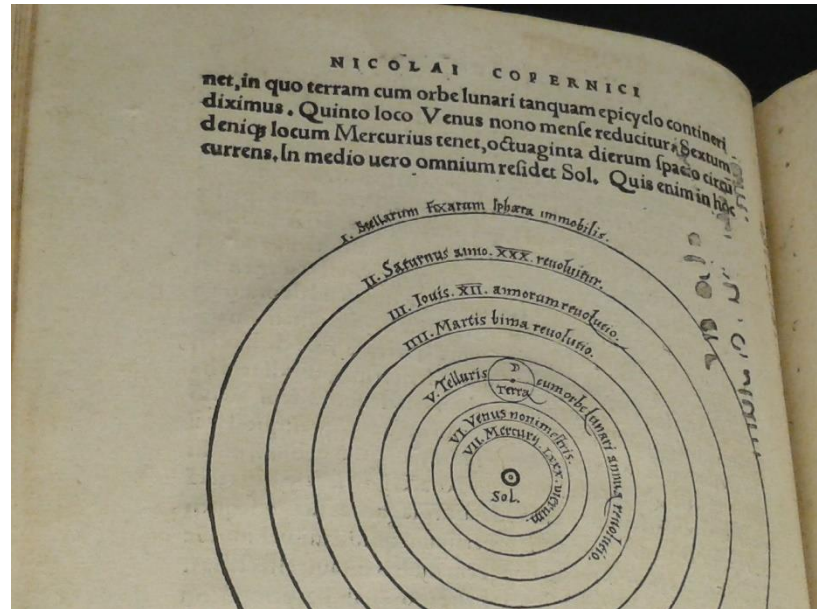


O pewnym artykule opublikowanym w toruńskim czasopiśmie w 503 lata po narodzinach Kopernika, jego autorze i znaczeniu



Karol Życzkowski (IFT UJ / CFT PAN / KCIK)

Instytut Fizyki, UMK Toruń

czwartek, 1 października 2020

**O pewnym artykule opublikowanym
w toruńskim czasopiśmie
w 503 lata po narodzinach Kopernika
(1473 + 503 = 1976)**

Vol. 10 (1976)

REPORTS ON MATHEMATICAL PHYSICS

No. 1

QUANTUM INFORMATION THEORY

ROMAN S. INGARDEN

Institute of Physics, Nicholas Copernicus University, 87-100 Toruń, Poland

Instytut Fizyki, UMK, Toruń
1 października 2020

**O pewnym artykule opublikowanym
w toruńskim czasopiśmie
w 503 lata po narodzinach Kopernika
(1473 + 503 = 1976)**

Vol. 10 (1976)

REPORTS ON MATHEMATICAL PHYSICS

No. 1

QUANTUM INFORMATION THEORY

ROMAN (S.) INGARDEN

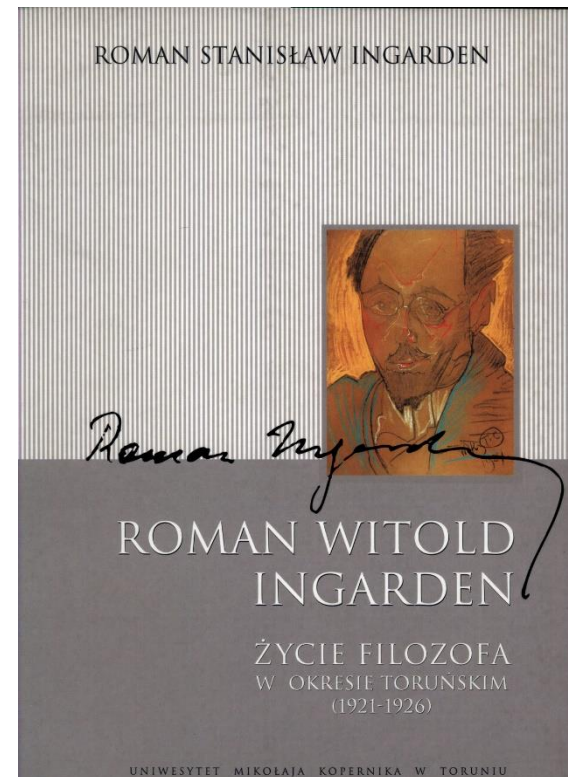
Institute of Physics, Nicholas Copernicus University, 87-100 Toruń, Poland

Instytut Fizyki, UMK, Toruń
1 października 2020

który Ingarden ?

Roman Witold Ingarden
(filozof) 1893 - 1970

Roman Stanisław Ingarden
(fizyk) 1920 - 2011



rok 2020 **Rokiem**
Romana Ingardena
Uchwała Sejmu RP
w 50. rocznicę śmierci
R. W. Ingardena



Rodzina Romana Witolda Ingardena (1893—1970), od lewej: Maria Pol-Ingardenowa (1889—1979), żona, Janusz Stefan (ur. 1923), najmłodszy syn, Roman Kajetan (1852—1926), ojciec, Roman Stanisław (ur. 1920), najstarszy syn, Roman Witold, Jerzy Kazimierz (1921—1949), średni syn, zdjęcie z III 1924 r., ul. Mickiewicza 115 (dziś 93), Toruń

Roman Stanisław Ingarden

(fizyk) 1920 - 2011

UMK Toruń

1969-86 dyrektor Instytutu Fizyki

1966-69 Katedra Termodynamiki i Teorii Promieniowania

1969-1986 Katedra Fizyki Teoretycznej

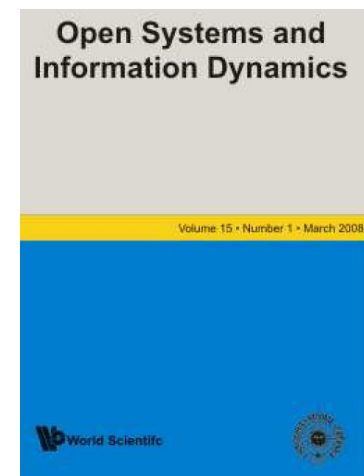
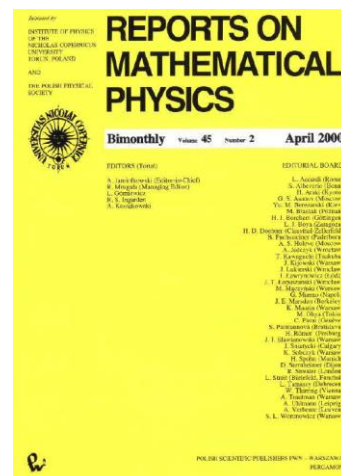
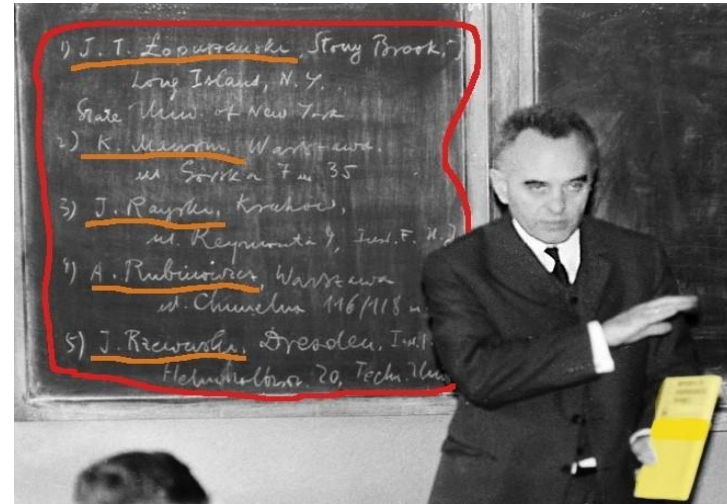
1986-1991 Katedra Fizyki Statystycznej

- twórca czasopism *Reports on Mathematical Physics* (1970)

Open Systems and Information Dynamics (1992)

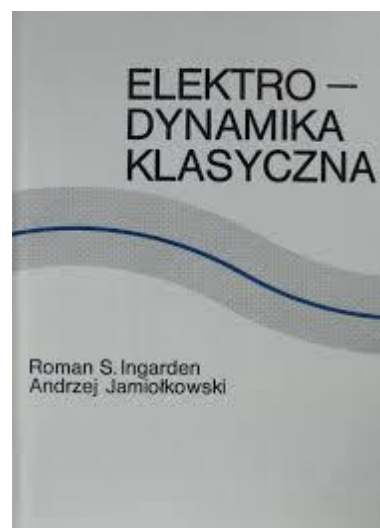
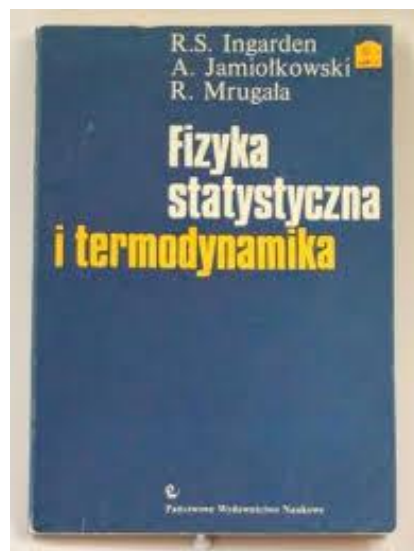
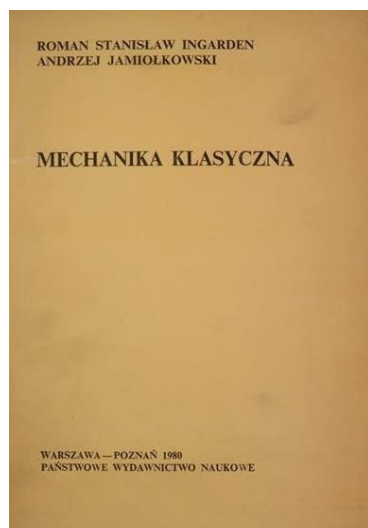
- wykłady z japonistyki na UMK

1996 doktor honoris causa UMK



Roman Stanisław Ingarden (fizyk) 1920 - 2011

polskie podręczniki
fizyki teoretycznej



prace i monografie dotyczące dynamiki
informacji i układów otwartych



FIZYK HUMANISTA ROMAN STANISŁAW INGARDEN

DOCTOR HONORIS CAUSA UMK

WYSTAWA Z OKAZJI 100. LECIA URODZIN PROFESORA
Wystawa pod Patronatem JM Rektora Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu

RODZINA KALENDARIUM

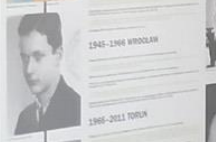
A. S. Ingarden



1892-1926 TORUŃ



1926-1945 ŁÓDŹ



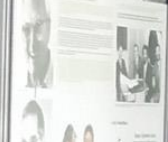
1945-1948 WROCLAW



1948-2011 TORUŃ

MISTRZOWIE FIZYK

A. S. Ingarden

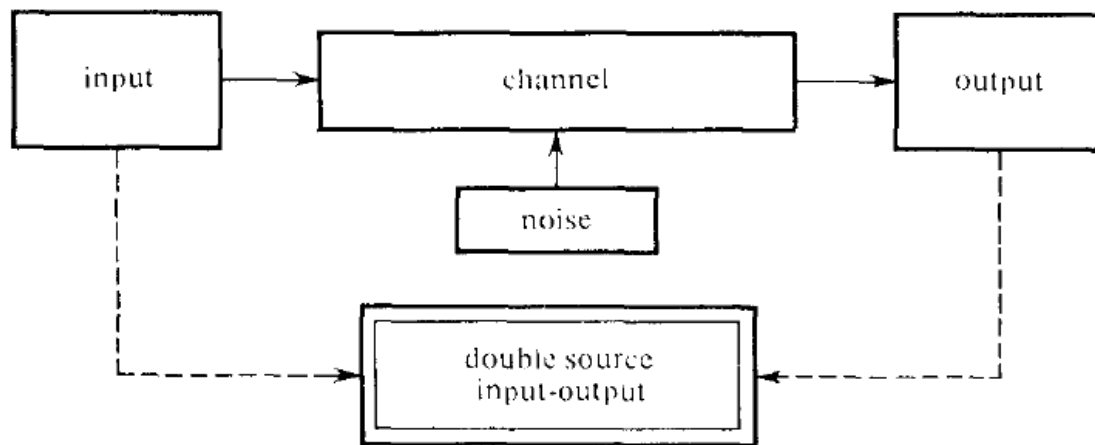


MISTRZOWIE HUMANISTA

A. S. Ingarden



QUANTUM INFORMATION THEORY



Schemat
transmisji
informacji
klasycznej
lub
kwantowej

Fig. 2. The block scheme of an information transmitting arrangement

- entropia **Shannona** i **von Neumanna** jako informacja
- informacja w kwantowych układach otwartych
- **entropia wzajemna**
- pojemność kanału
- **kodowanie** informacji kwantowej
- kwantowy analog entropii dynamicznej Kolmogorowa-Synaja

Concept	Input	Output
Alphabet	$A = \{x_1, \dots, x_a\}$	$B = \{y_1, \dots, y_b\}$
Set of sequences of $n \in \mathbb{N}$ letters (n -words)	$\Omega_A^{(n)} = A^n = \underbrace{A \times \dots \times A}_n$	$\Omega_B^{(n)} = B^n = \underbrace{B \times \dots \times B}_n$
Set of doubly infinite sequences of Z -words	$\Omega_A = A^{\mathbb{Z}}$	$\Omega_B = B^{\mathbb{Z}}$
Probability measure of n -words	$p_A^{(n)}$ on $\mathcal{B}(\Omega_A^n)$	$p_B^{(n)}$ on $\mathcal{B}(\Omega_B^{(n)})$
Probability measure on Z -words	p_A on $\mathcal{B}(\Omega_A)$	p_B on $\mathcal{B}(\Omega_B)$
Information of n -words	$H_n(A)$ $= - \sum_{i \in \Omega_A^{(n)}} p_A^{(n)}(i) \ln p_A^{(n)}(i)$	$H_n(B)$ of $p_B^{(n)}$ analogously
Information of Z -words per one letter	$H(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} H_n(A)$	$H(B) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} H_n(B)$

Thus we see that our theory gives qualitatively reasonable results. For quantitative checking and practical applications the theory requires further investigations and mathematical development. The aim of the present paper was only to give a general formulation of the quantum information theory of the Shannon type.

Stan kwantowy $|\psi\rangle$:
obiekt **matematyczny** pozwalający
wyliczyć **prawdopodobieństwo**
uzyskanych wyników pomiarów

Cząstka: funkcja falowa $|\psi(x)\rangle$

bit (*binary unit*) = $\{0,1\}$

Qubit : (**q**uantum **b**it) =

(kwantowy układ o 2 rozróżnialnych stanach)

wektor

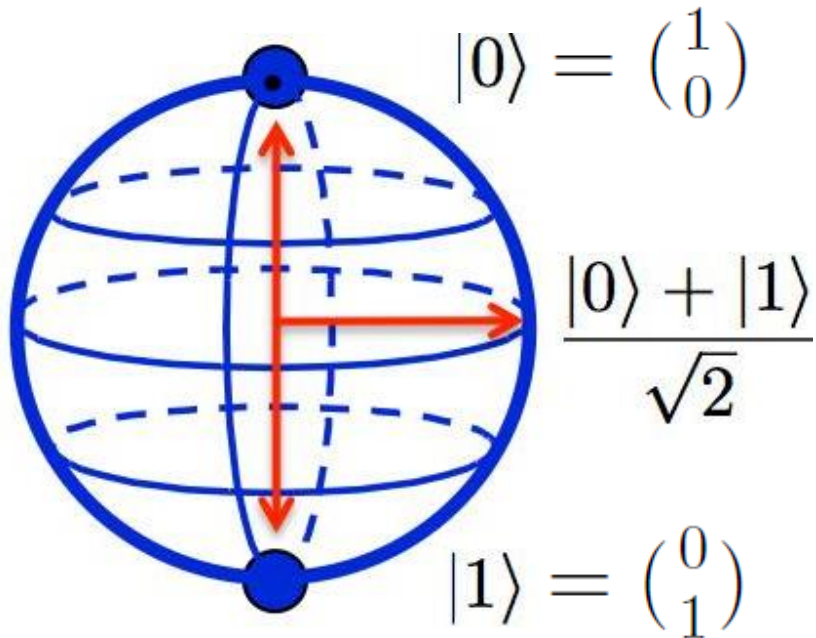
$$|\psi\rangle = \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \end{pmatrix} = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$$

Składowe wektora $|\psi\rangle = \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \end{pmatrix}$

określają **prawdopodobieństwo** uzyskania
danego wyniku pomiaru $p_0 = |c_0|^2, p_1 = |c_1|^2$

● 0

● 1



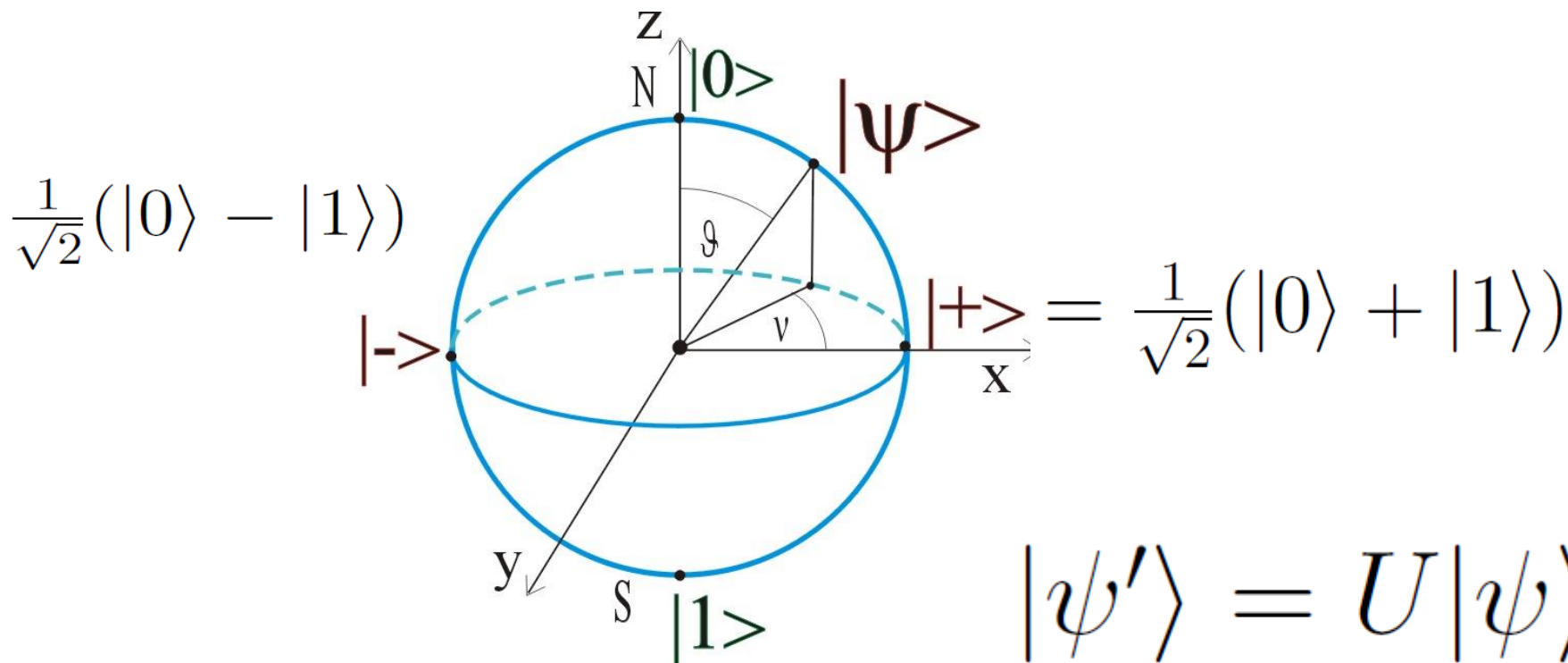
stan qubitu
=
punkt na
sferze
Blocha

normalizacja stanu:

$$p_0 + p_1 = |c_0|^2 + |c_1|^2 = 1$$

Stany nieklasyczne: $|0\rangle$, $|1\rangle$

nieklasyczne: $|+\rangle$, $|-\rangle$, $|\psi\rangle$



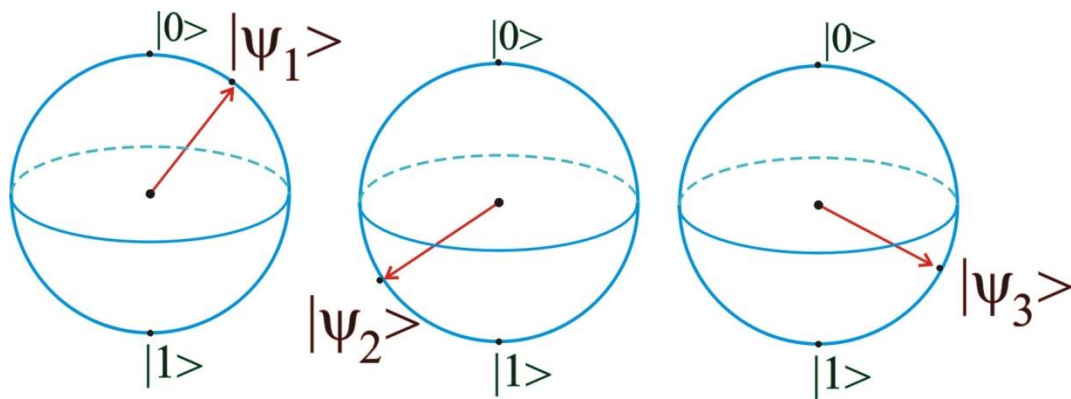
$$|\psi'\rangle = U|\psi\rangle$$

superpozycja kwantowa – stan czysty $|\psi\rangle$

różni się od **klasycznej** mieszanki stanów
(punkt wewnątrz kuli Blocha)

Teoria **informacji klasycznej**:
operowanie na bitach: $\{0,1\}$

Teoria **informacji kwantowej** :
operowanie na **qubitach**: $|\psi_1\rangle, |\psi_2\rangle, |\psi_3\rangle$



Zalety:

- a) większa **przestrzeń** stanów
- b) większy zbiór dostępnych operacji

Układy dwucząstkowe: {A,B}

a) Stan **separowalny** (produktowy)

$$|\psi_{\text{sep}}\rangle = |\psi_A, \psi_B\rangle = |\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle$$

b) Stan **splątany** (nieproduktowy)

$$|\psi_{\text{ent}}\rangle \neq |\psi_A, \psi_B\rangle = |\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle$$

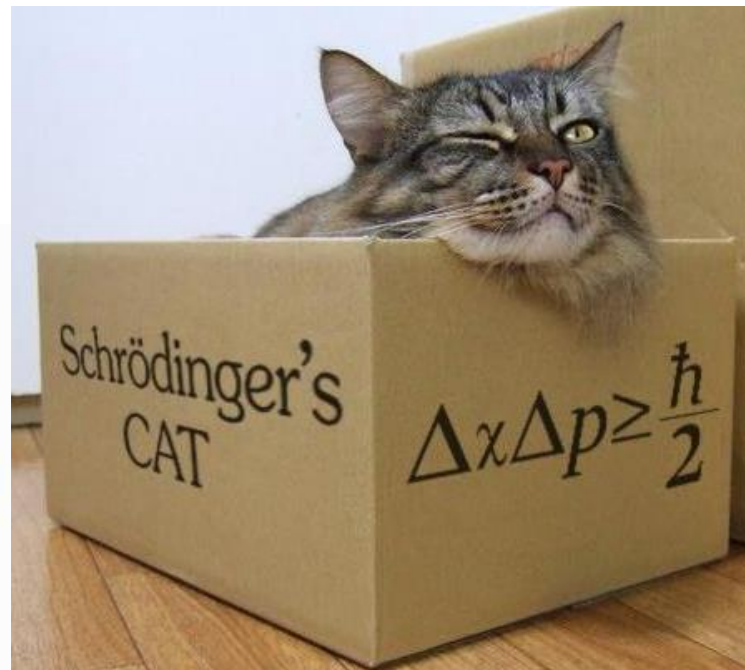
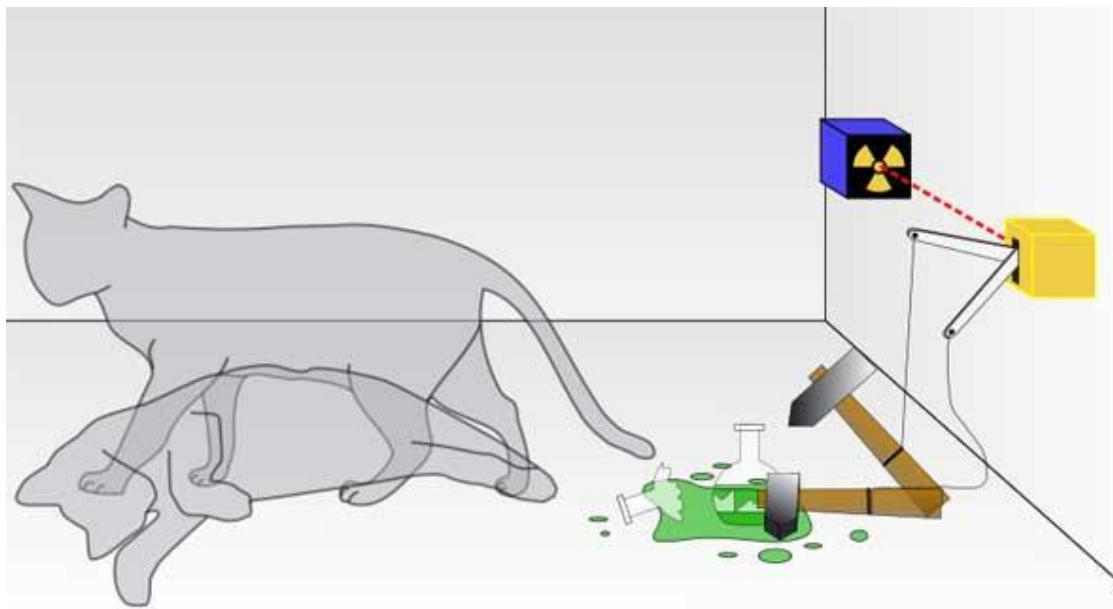
Superpozycja 2 stanów dwucząstkowych

Przykład: stan **Bella**

$$|\psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

Stan **splątany** wykazuje kwantowe korelacje, to skutek uprzedniego **oddziaływania** pomiędzy **podukładami**

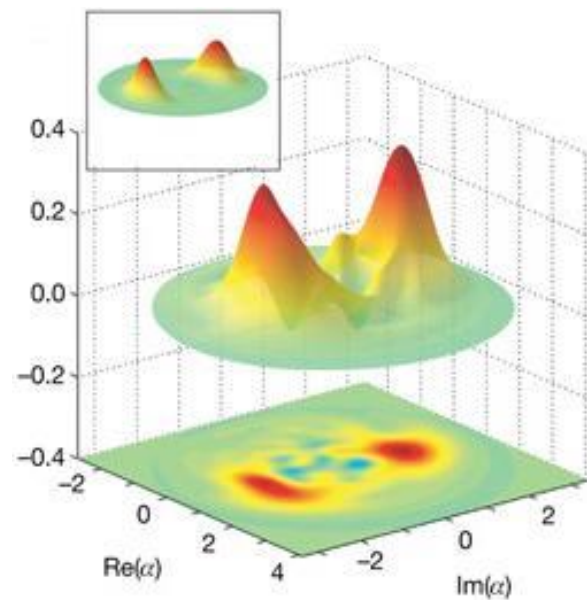
Kot Schrödingera



Kwantowa superpozycja:

$$|\uparrow\rangle | \text{cat sitting} \rangle + |\downarrow\rangle | \text{cat dead} \rangle$$

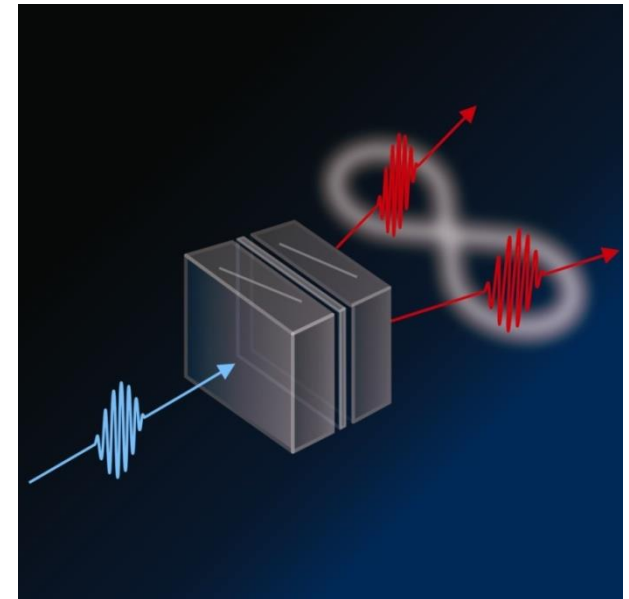
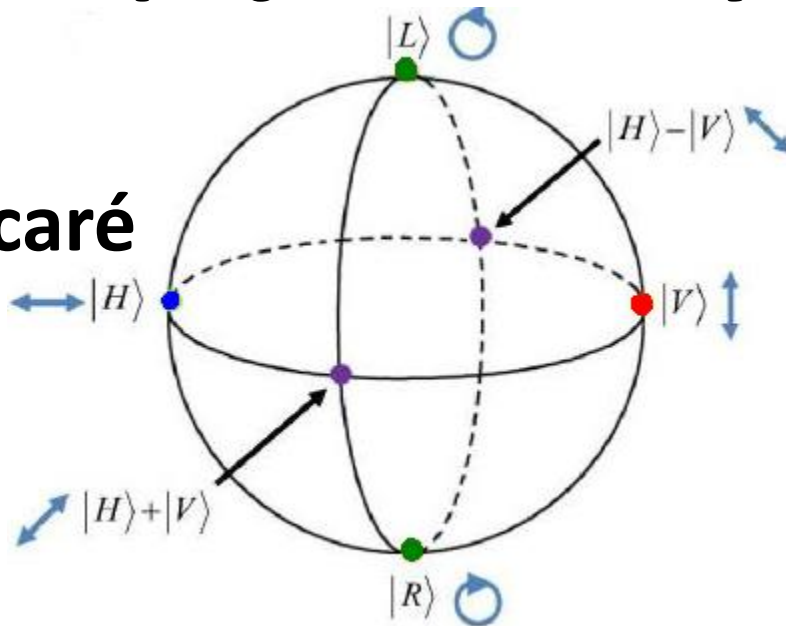
stan splątany



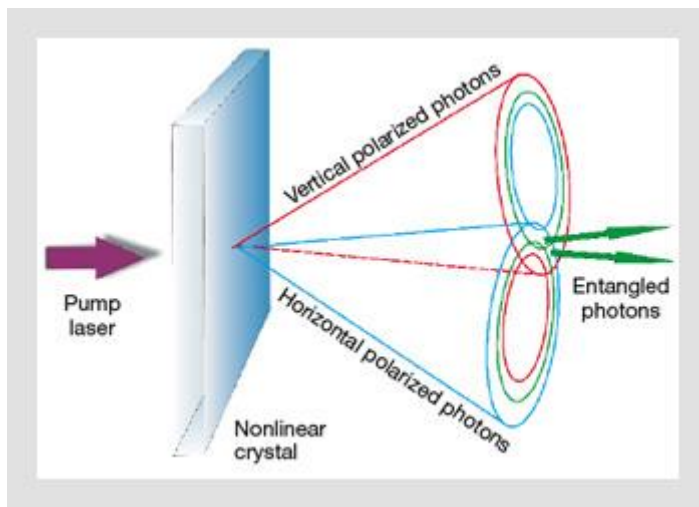
Haroche (i inni) 2008

Polaryzacja światła i splątane stany 2 fotonów

sfera
Poincaré

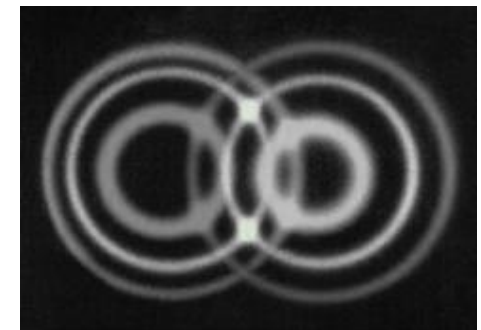


konwersja: 1 foton niebieski
-> 2 fotony czerwone

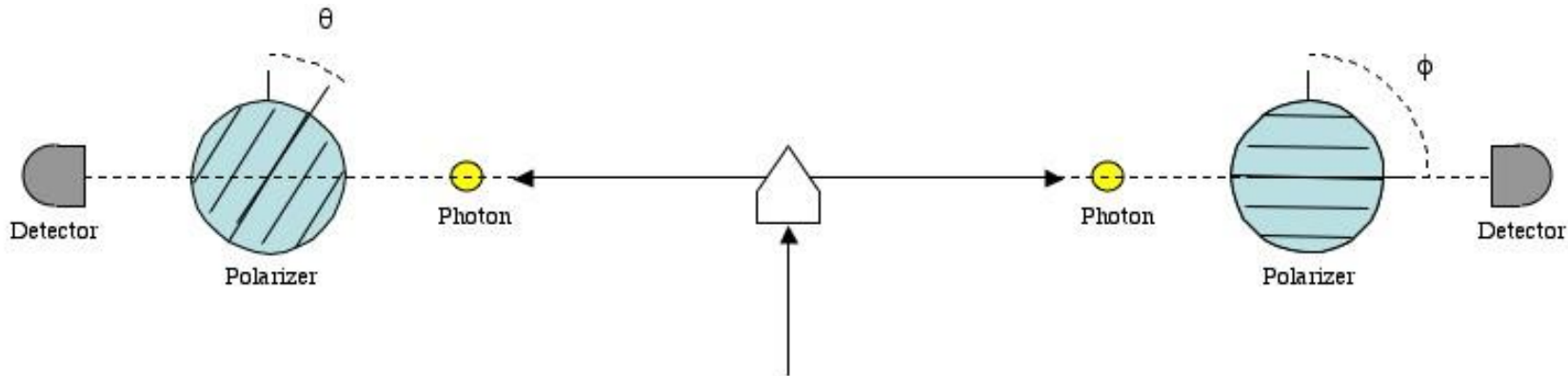


stan splątany:

$$|HV\rangle + |VH\rangle$$



1. Splątanie kwantowe: korelacje pomiędzy wynikami 2 detektorów



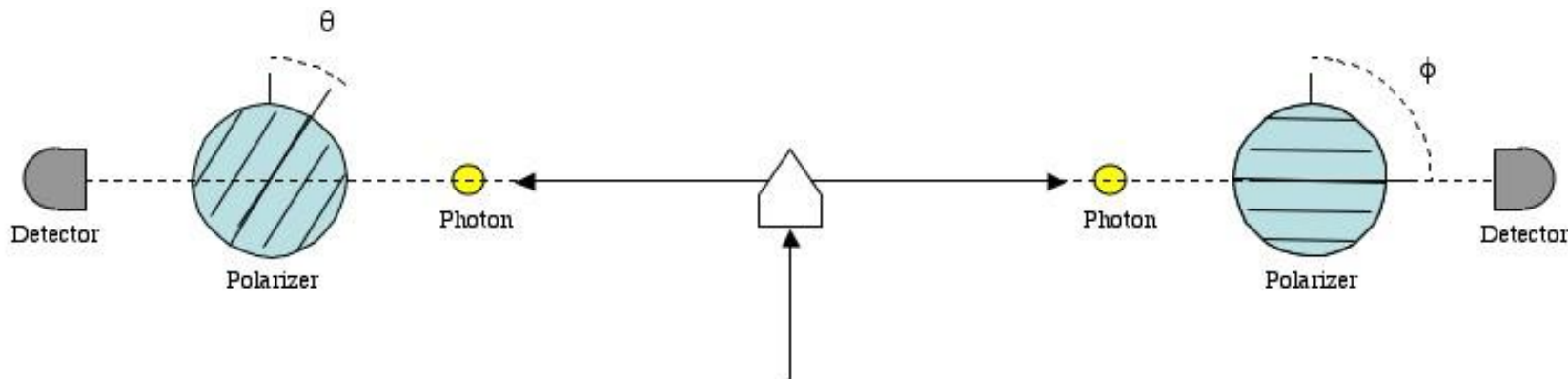
$$|\psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

2. Analogia do kota Schrödingera

$$|\uparrow\rangle |\text{cat sitting}\rangle + |\downarrow\rangle |\text{cat lying down}\rangle$$

The diagram shows the Schrödinger's cat analogy. It features two black silhouettes of a cat: one sitting upright and one lying down. These are placed next to the corresponding terms in the quantum state equation, illustrating the superposition of the cat's states.

3. Istnienie stanów **splątanych** nie narusza zasad relatywistycznych:



nie można przekazać informacji
z prędkością **nadświatłą** !

4. Stany **splątane** istnieją lecz są nietrwałe:
niszczy je oddziaływanie z **otoczeniem** –
a każdy **pomiar** zaburza stan **kwantowy** !

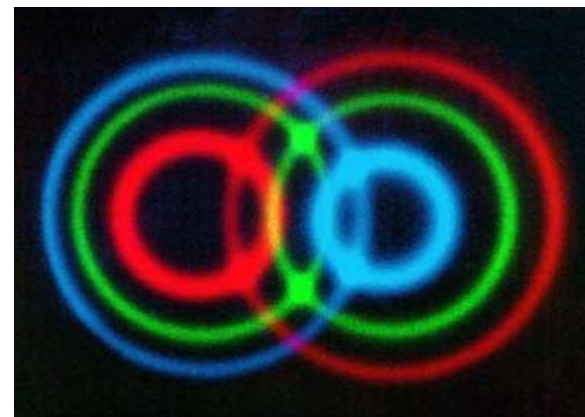
Przetwarzanie **informacji**
kwantowej wykorzystuje
efekty **superpozycji** kwantowej
oraz
kwantowego splątania

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$

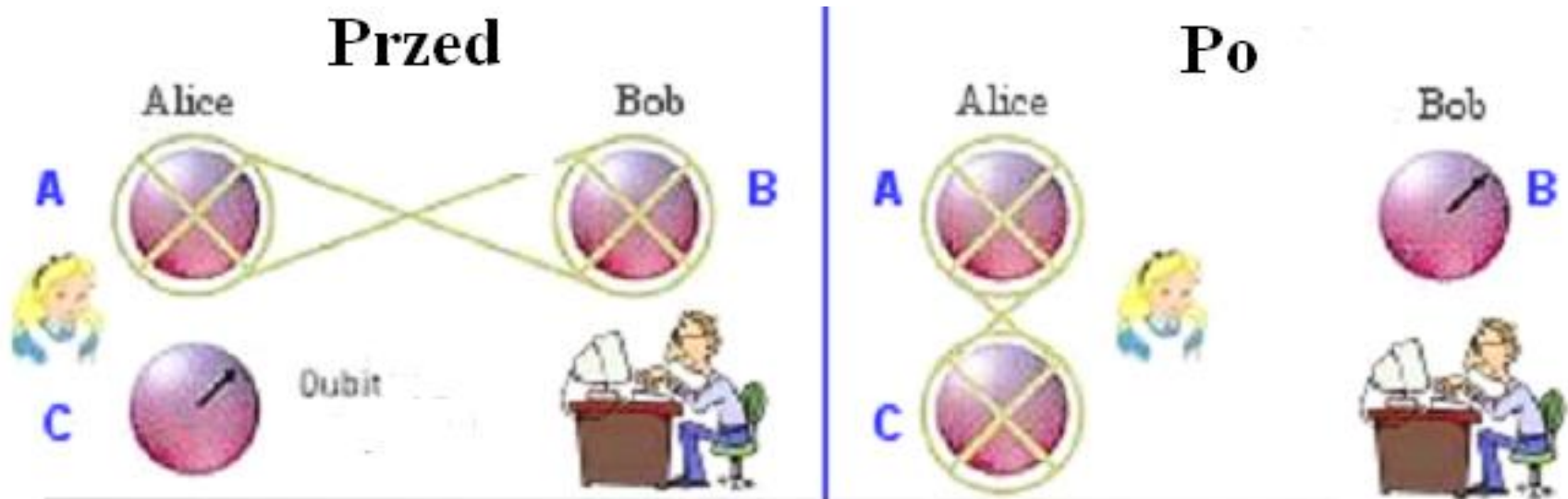
$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

zastosowania :

- ** **kwantowa** teleportacja
- ** **kwantowe** kryptografia
- * **kwantowe** obliczenia
 - kwantowa metrologia, symulacje
 - kwantowe uczenie maszynowe !
 - kwantowe gry („kwantowe finanse”)



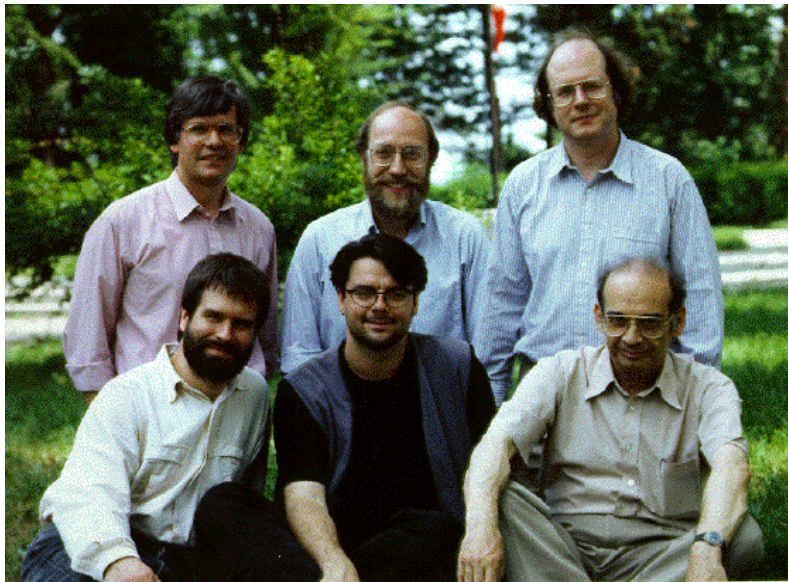
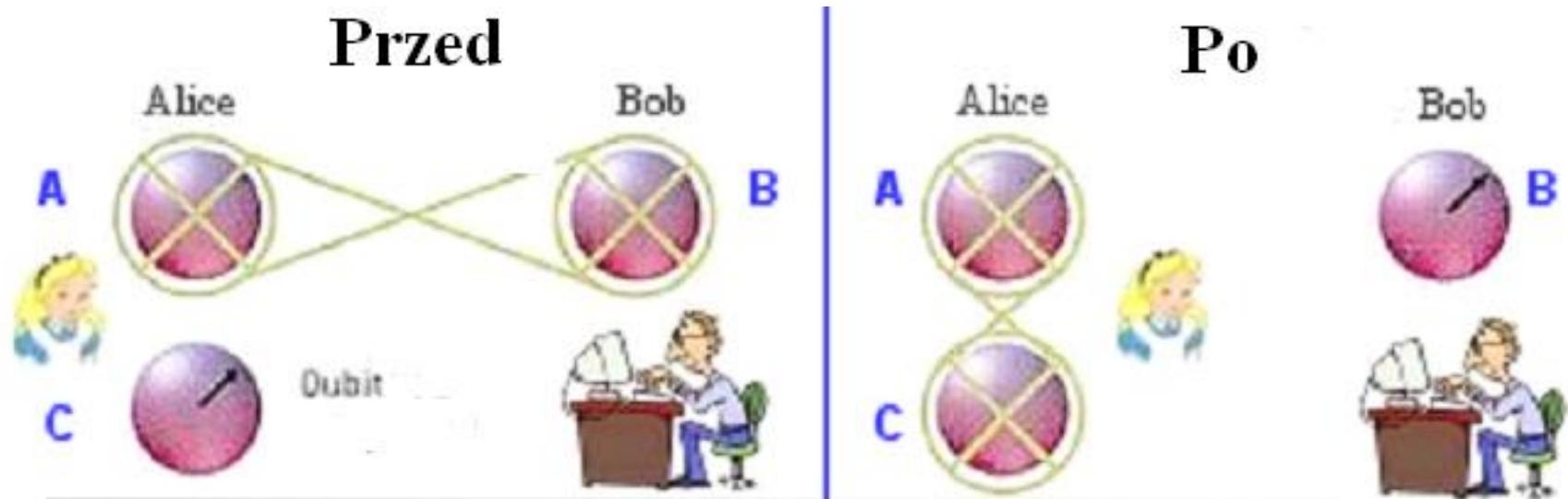
schemat kwantowej teleportacji



Wykorzystując **stan Bella**
Alicja przesyła na odległość
nieznany stan **C**
odtworzany przez **Boba**

Co jest **teleportowane**?

Schemat kwantowej teleportacji



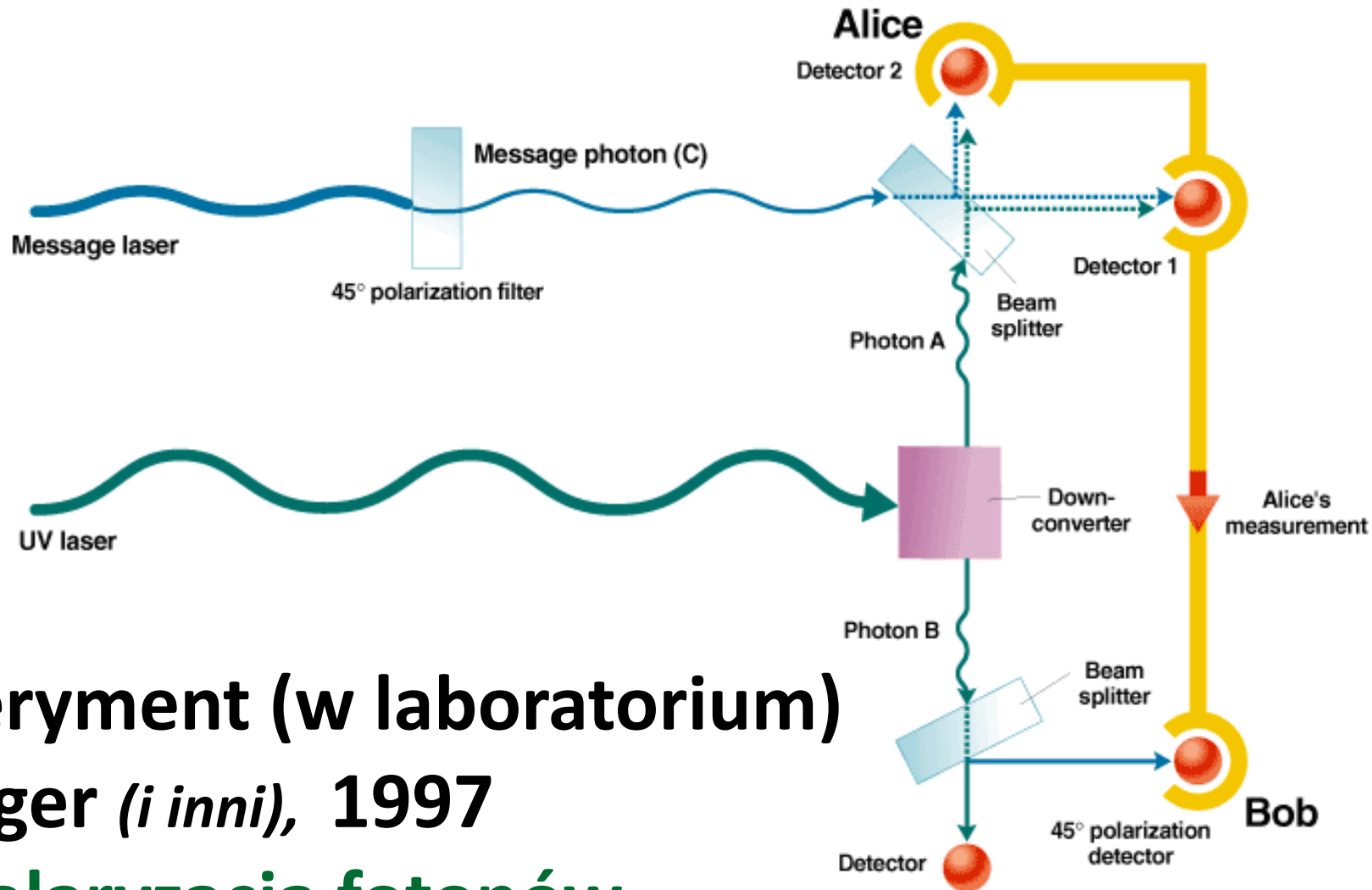
Wykorzystując **stan Bella**
Alicja przesyła na odległość
nieznany stan **C**
odtworzany przez **Boba**

Co jest **teleportowane**?
Kwantowa informacja !

Bennett et al. 1993

Kwantowa teleportatacja

teoria: Bennett (*i inni*) 1993



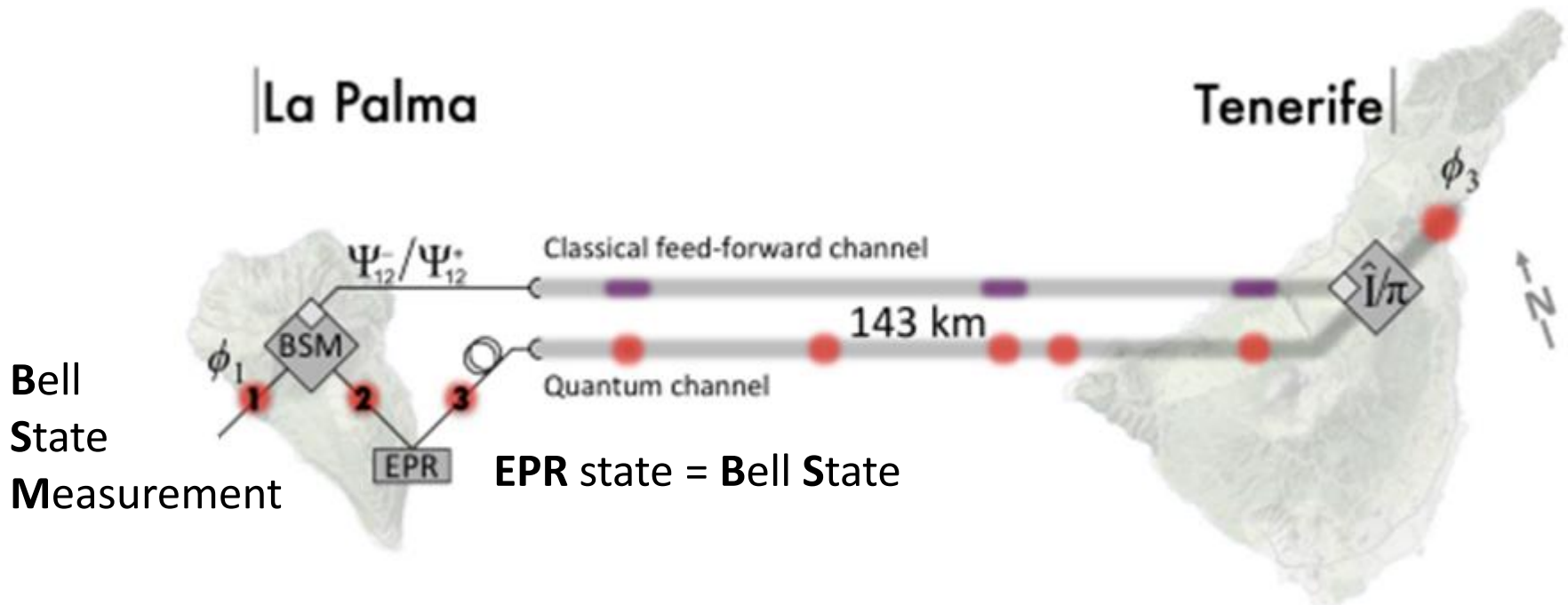
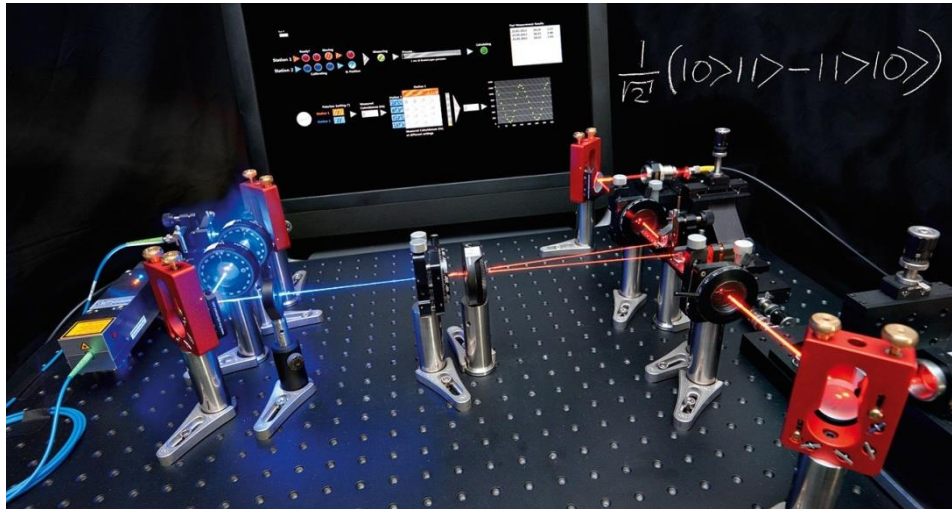
eksperyment (w laboratorium)

Zeilinger (*i inni*), 1997

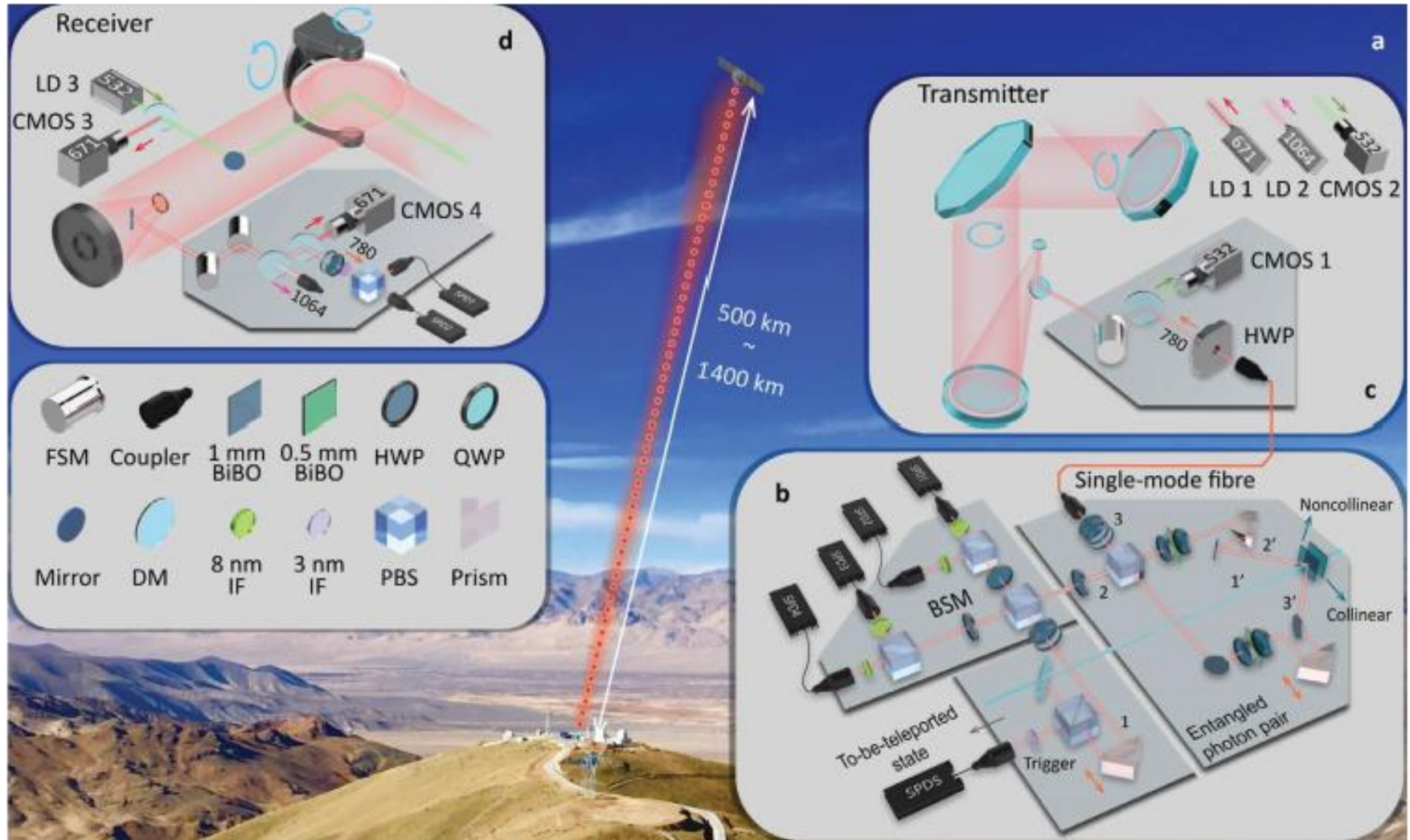
polaryzacja fotonów

teleportacja na 143 km, wyspy kanaryjskie

European Space Agency, 2012



Ground – to satellite quantum teleportation at 1400 km

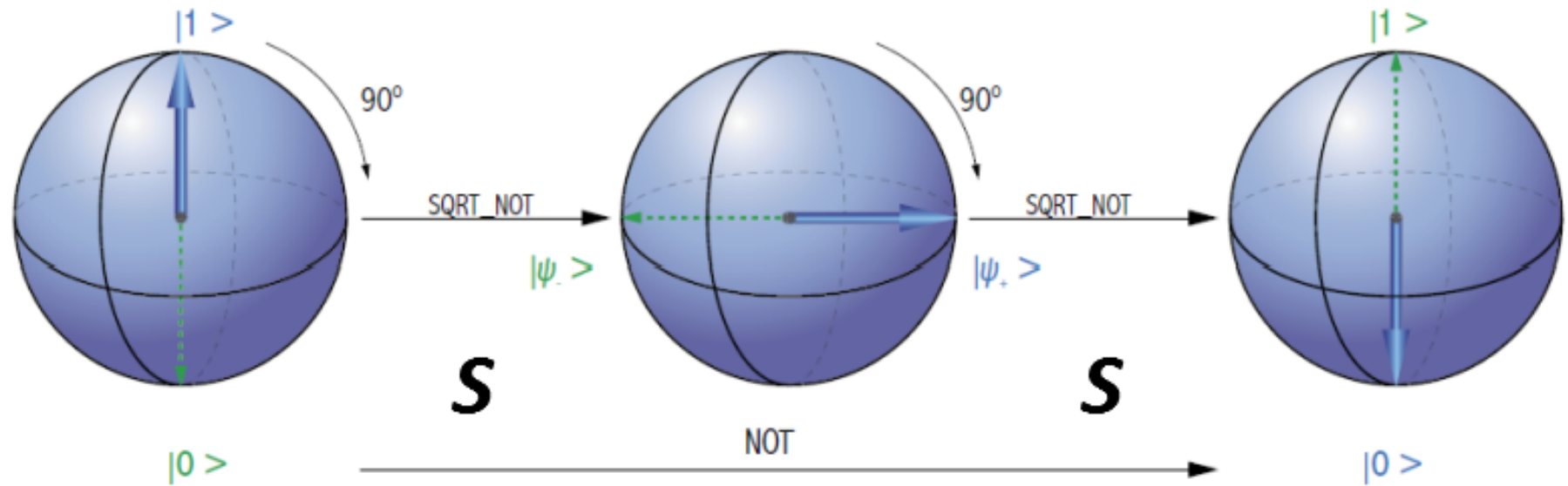


group of J.-W. Pan, *Nature* 2017

Quantum dynamics:

example of a non-classical
1-qubit (local) gate :

$$|\psi'\rangle = U|\psi\rangle$$



$S = \text{square root of } NOT \text{ gate} \Rightarrow S^2 = NOT$

Unitary evolution matrix **U** can be decomposed into
elementary local gates and 2-qubit **Control NOT** gate

1-qubit **Hadamard** gate

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

induces **superposition**, $H|0\rangle = |+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$

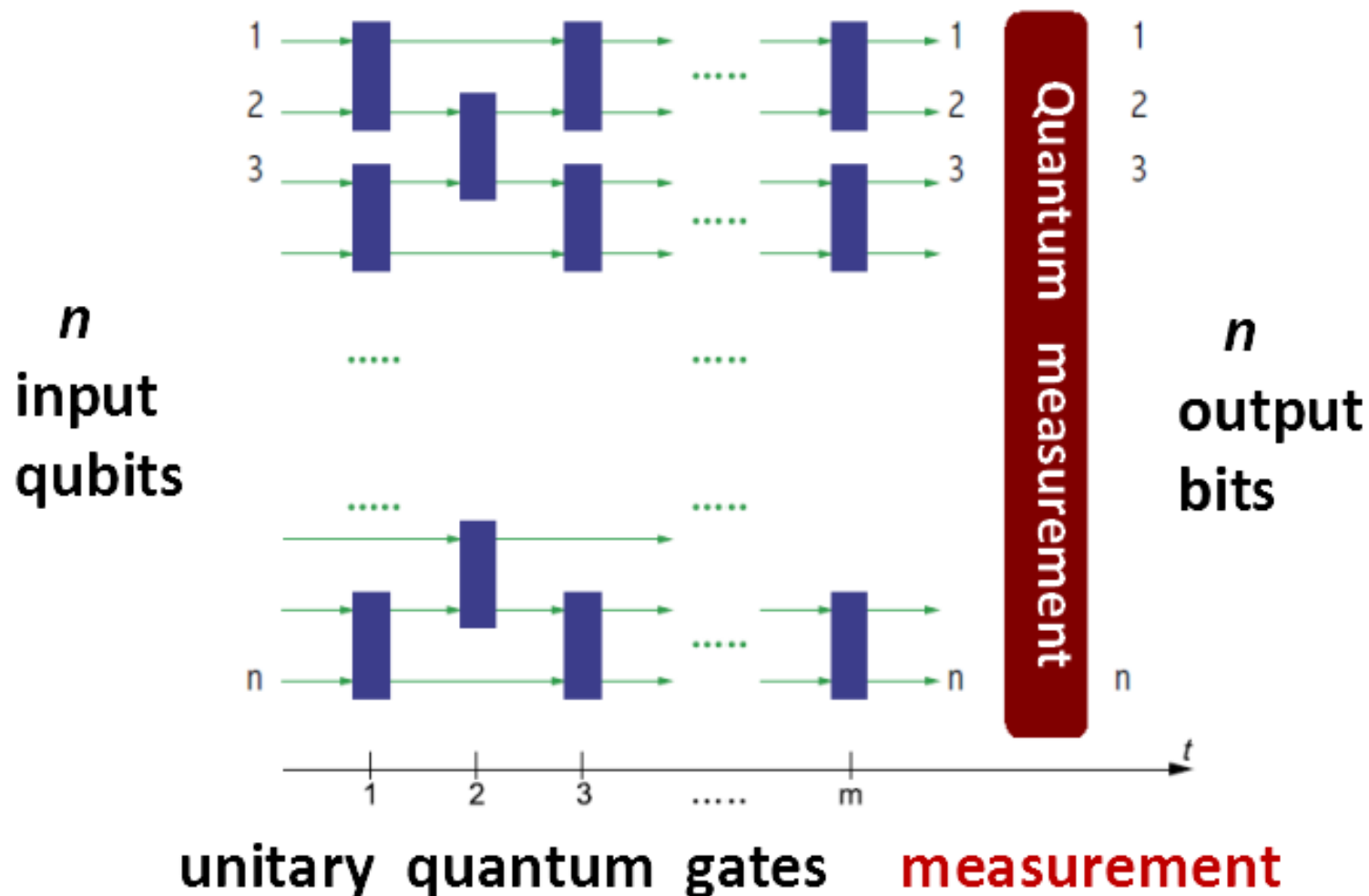
2-qubit **Control NOT** gate
is non-local, and it

$$U_{CNOT} = \begin{bmatrix} \mathbb{1} & 0 \\ 0 & \sigma_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

creates **entanglement**,

$$U_{CNOT}|+,0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) = |\psi^+\rangle$$

universal quantum computation scheme



Measurement brings inherent **randomness**:

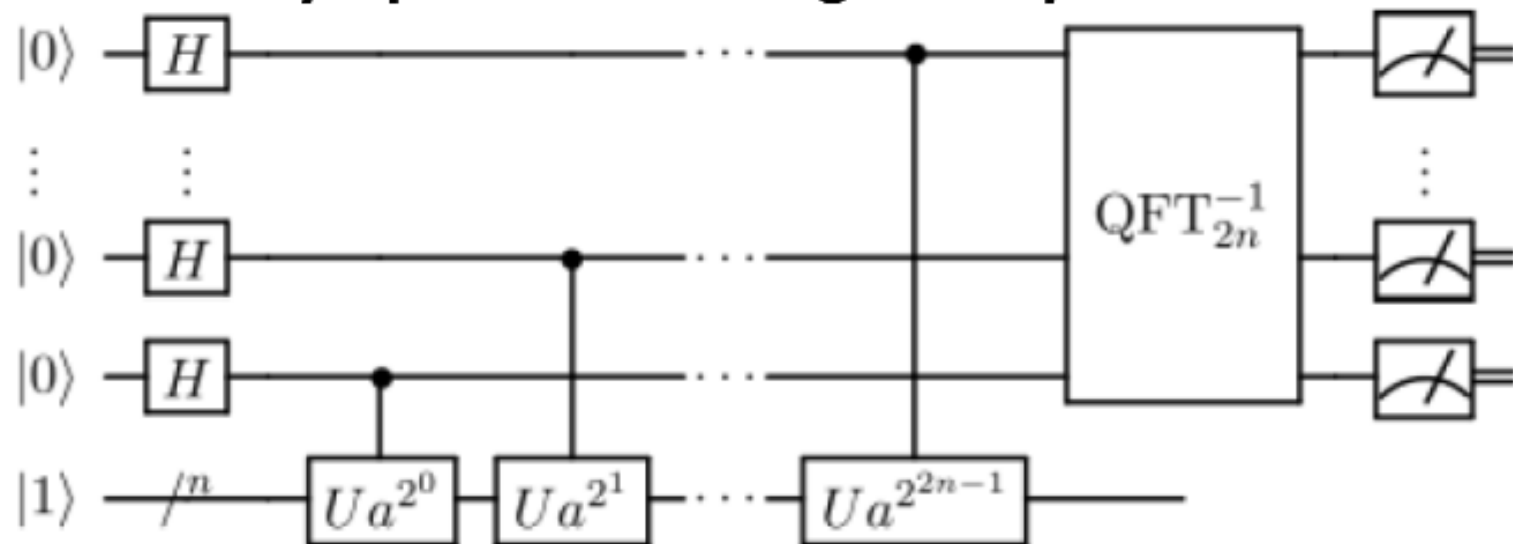
for state $|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$ probability $p_0 = |c_0|^2$

Example: **Shor's algorithm** (1994)

Factorization of a number M is as difficult as finding the period T of a periodic function, $f(x) = f(x+T)$

Quantum Fourier transform (QFT)

a unitary operation acting on n qubits with $M < 2^n$



Complexity measured by number of operations :

classical $\sim \exp(M^{1/3})$

quantum $\sim M^3 \log M$

quantum cryptography: key idea

- a) If we **measure** a quantum state, we **alter** it
- b) **Observation** of a quantum system **modifies** it
- c) Any **action** of an evesdropper **can be detected**

quantum key generation (*truly random digits*)

quantum key distribution (*ensures security*)

quantum cryptography: key idea

- a) If we **measure** a quantum state, we **alter** it.
- b) **Observation** of a quantum system **modifies** it.
- c) Any **action** of an eavesdropper **can** be **detected**.

quantum key generation (*truly random digits*)

quantum key distribution (*ensures security*)

Commercial products, e.g.

ID Quantique (*Geneve*)



Current trends in theory of quantum information:

search for new

- algorithms for quantum computing
- ideas to demonstrate quantum supremacy
- techniques to process quantum information
- original applications

but also preparatory work

- studies on quantum states and operations
- investigations of correlations and entanglement
- foundations of quantum theory
- mathematics motivated by quantum information
-

Gdzie jest **fizyka**?

Kopnij piłkę !



zatrzyma się

Kup lody
i poczekaj chwilę...



roztopią
się...

Gdzie jest **fizyka**?

Kopnij piłkę !



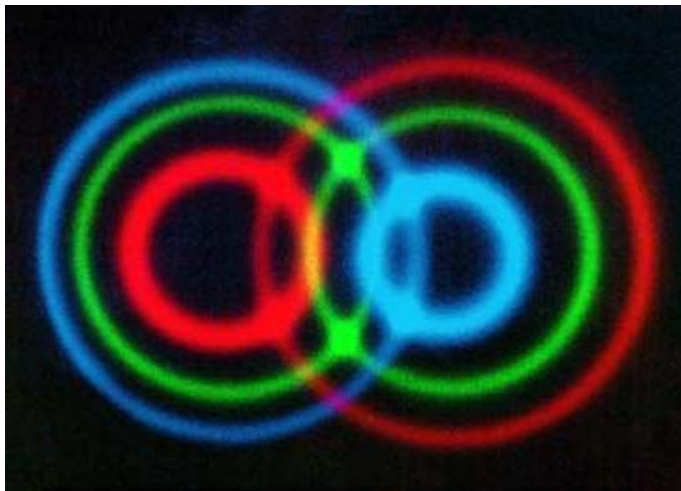
zatrzyma się

Kup lody
i poczekaj chwilę...



roztopią
się...

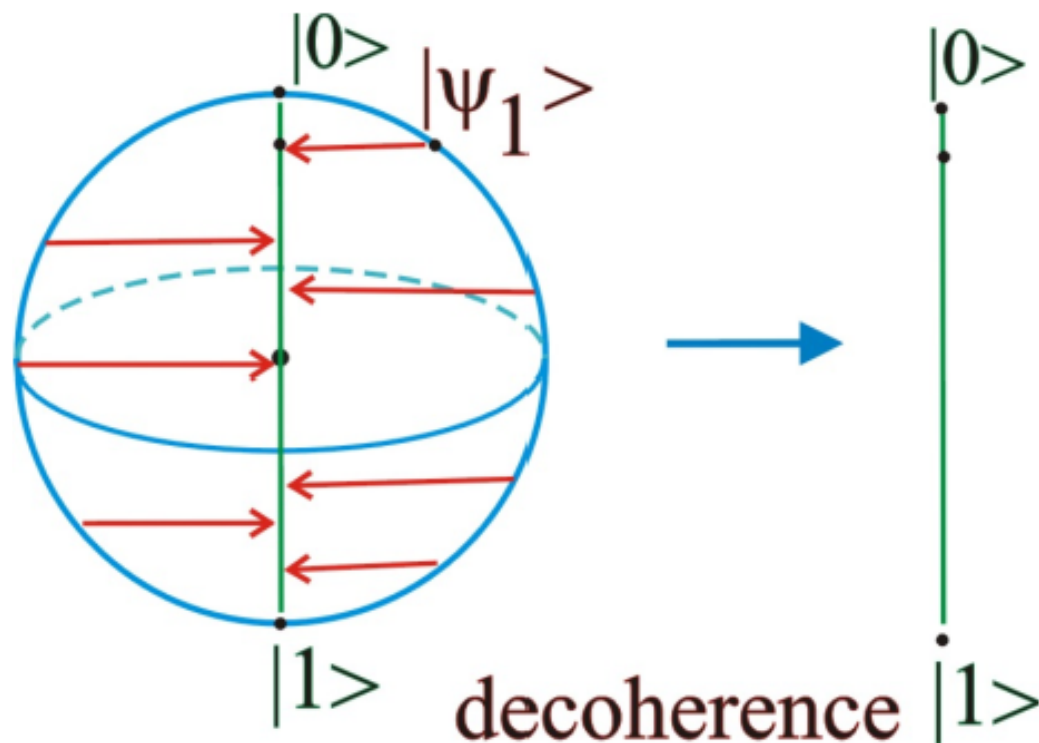
Utwórz splątany **stan Bella** $\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$
i poczekaj...



Splątanie zaniknie
w wyniku dekoherencji...

some quantum features (and problems):

- a) results are probabilistic - need for repetitions
- b) quantum superposition gets spoiled due to interaction of a **qubit** with an **environment**



decoherence:
a pure **state** $|\psi\rangle$
is transformed
into a **classical**
mixed state

Quantum evolution

Closed system – unitary evolution:
linear, deterministic, reversible

$$|\psi'\rangle = U|\psi\rangle$$

Quantum superposition and entanglement is
affected by an interaction with environment.

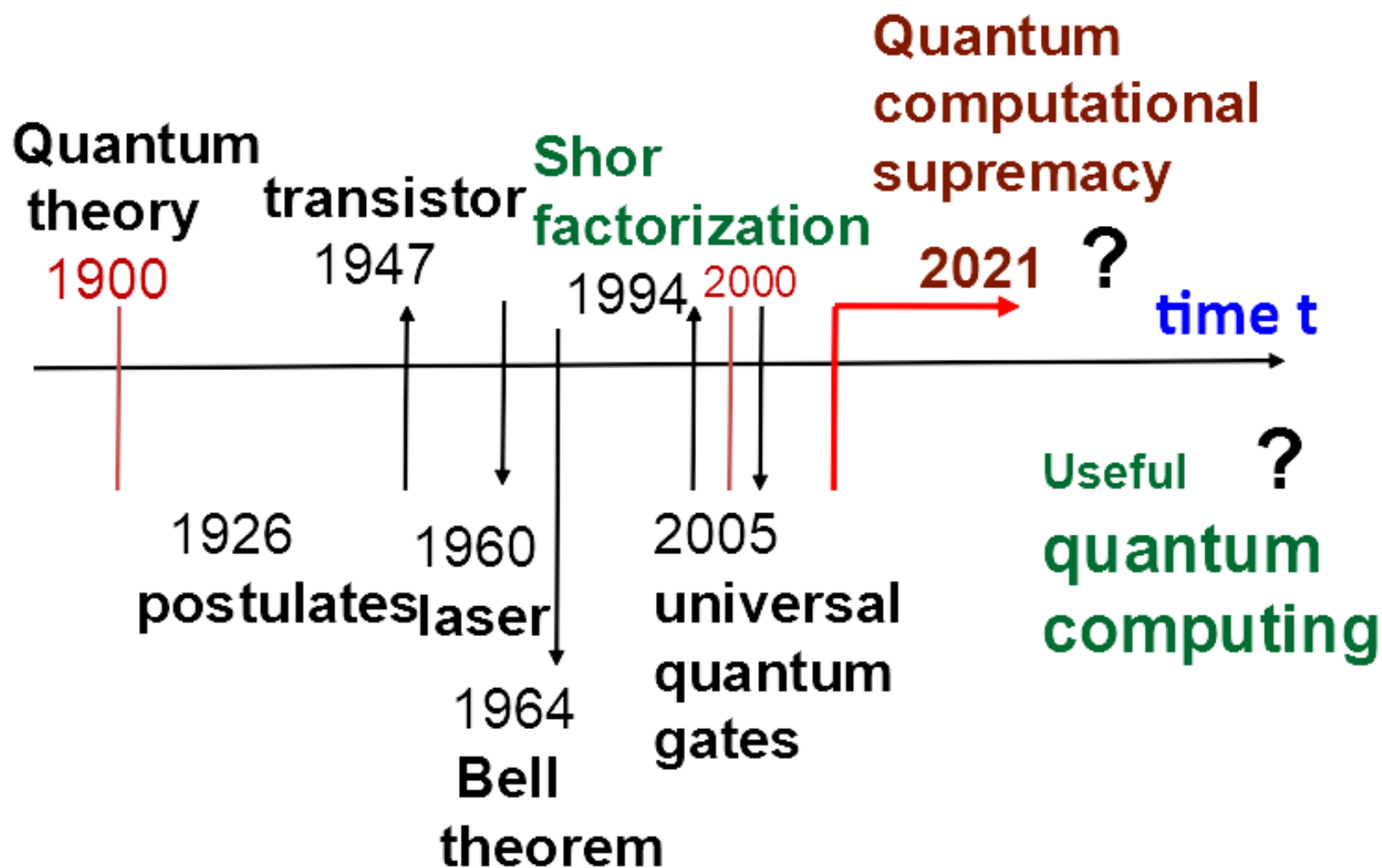
Interacting quantum system (measurement):
non-unitary evolution: non-linear, stochastic,
irreversible

$$\rho' = \Phi(\rho) = \text{Tr}_{\mathcal{E}}[U(\rho \otimes \sigma)U^\dagger]$$

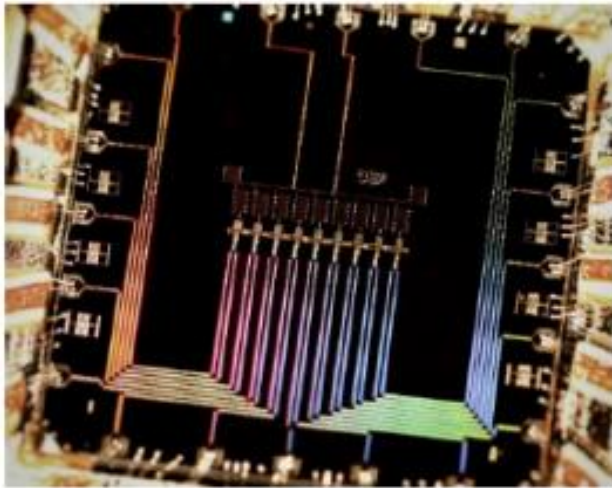
The paradox of quantum measurement:

To infer something about the quantum system
we have to perform measurements
which influence it.

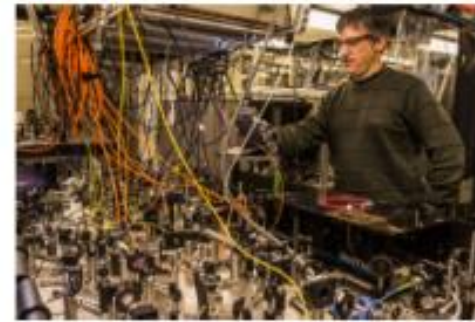
Time scale of the Second Quantum Revolution



recent significant progress and fierce competition



Martinis (Google)



ionQ



IBM cloud computer



DWAVE2



Rigetti

+LABS all over the world

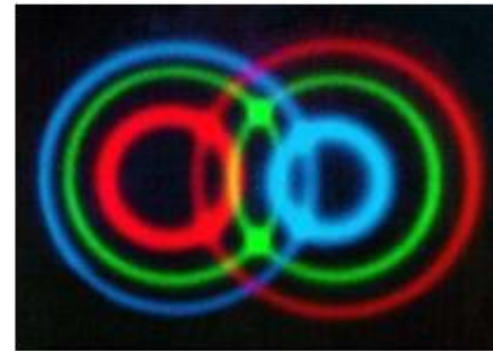
- Jak wygląda Twój prototyp kwantowego komputera?
- Wspaniale!
- Projekt jest w stanie superpozycji całkowitego sukcesu oraz jeszcze nawet nie rozpoczętego...
- A czy mógłbym go oglądnąć ?
- To jest podchwytliwe pytanie...

DILBERT



Kwantowy komputer dziś

Concluding remarks



Quantum information evolves rapidly

- **new theoretical ideas** are currently developed due to a constructive interference of physics, mathematics and computer science,
- fast progress of quantum technology allows us to witness their for **practical implementation**,
- there are still several inspiring problems open :



You are **welcome**
to contribute to the field !

Kwantowa **informacja** w Polsce



**Krajowe Centrum
Informatyki Kwantowej ,
Uniwersytet Gdański**



oraz silne grupy badawcze w **Warszawie**
Poznaniu, Wrocławiu, Krakowie.



**Krajowe laboratorium
FAMO, UMK Toruń**

**Jest co
badać !**

który Ingarden ?

**Roman Witold
Ingarden
1893 - 1970**



*Jagiellońskie Centrum Językowe,
ul. **Romana Ingardena 3**, Kraków*

który Ingarden ?

**Roman Witold
Ingarden
1893 - 1970**



*Jagiellońskie Centrum Językowe,
ul. **Romana Ingardena 3**, Kraków*

**Roman
Stanisław
Ingarden
1920 - 2011**



prekursor japonistyki
w Toruniu!

który Ingarden ?

**Roman Witold
Ingarden
1893 - 1970**



*Jagiellońskie Centrum Językowe,
ul. **Romana Ingardena 3**, Kraków*

**Roman
Stanisław
Ingarden
1920 - 2011**



prekursor japonistyki
w Toruniu!

*Centrum Językowe UMK,
ul. **Romana Ingardena 3**,
Toruń !*

R.S. Ingarden Memorial Session

organizowana przez $\langle KC|K \rangle$ (*on line*)

Środa, **25 listopada** 2020, godz. 15.30



*** R.S. Ingarden Memorial Talk:**
by Charles Bennett (IBM Research)

zapraszamy !