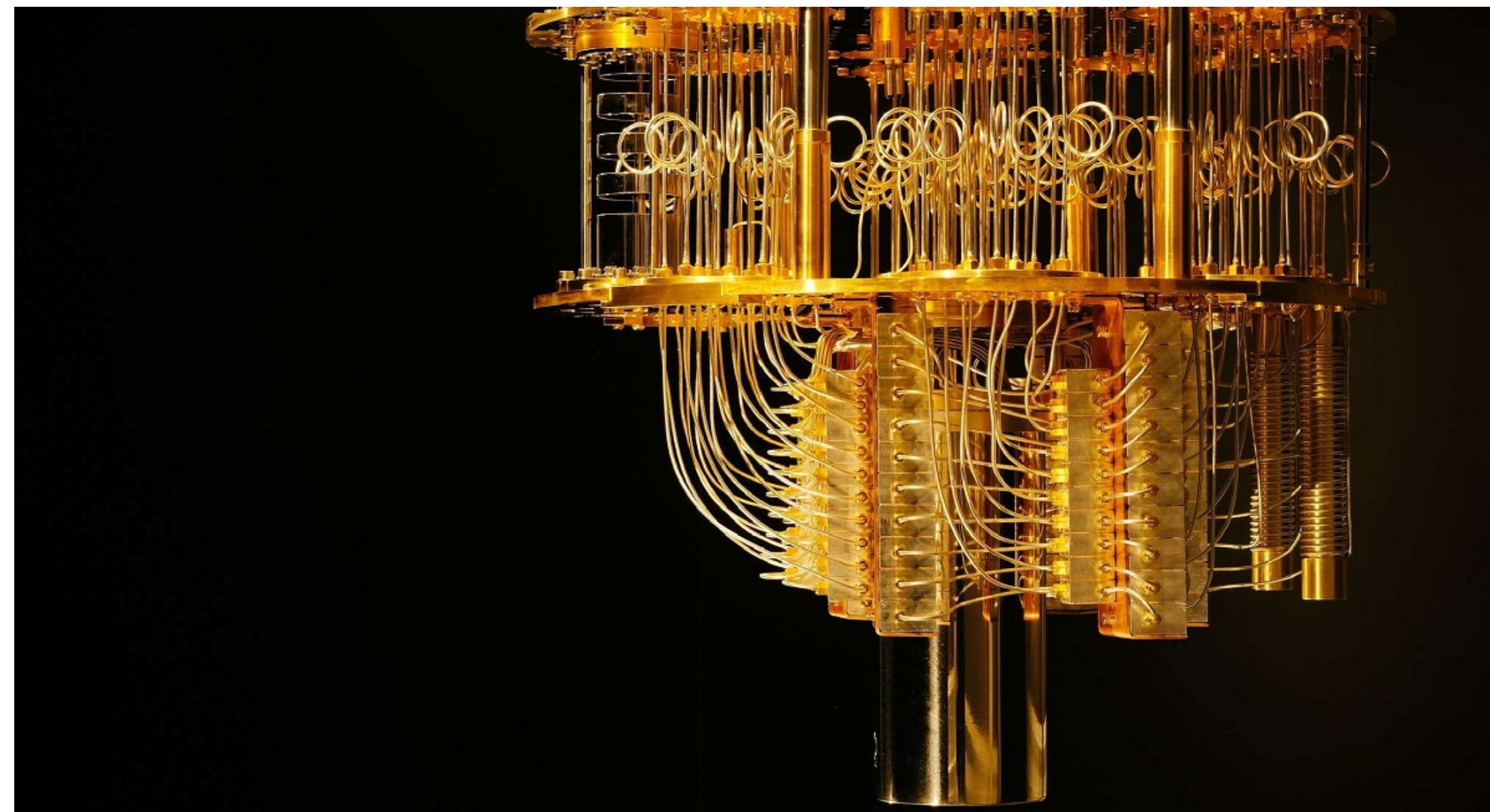


Tecnologie quantistiche

Didattica della fisica quantistica



Chiara Macchiavello
Lidia Falomo
Massimiliano Malgieri
Claudio Sutrinì

Entanglement



“The entanglement is the characteristic trait of Quantum Mechanics, the one that enforces its entire departure from classical line of thoughts.” (E. Schroedinger, 1935)

“The deep ways that quantum information differs from classical information involve the properties, implications, and uses of quantum entanglement.” (J. Preskill, 2009)

Entanglement

Entanglement, Nonlocality, Superluminal Signaling and Cloning

GianCarlo Ghirardi*

Emeritus, University of Trieste,

The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste.

"Come già anticipato, dopo la chiara dimostrazione da parte di J.S. Bell della natura fondamentalmente non locale dei processi fisici che coinvolgono costituenti lontani in uno stato entangled, molte proposte sono state avanzate, sia in corrispondenza privata che in articoli scientifici, suggerendo come mettere in evidenza effetti superluminali. Inizieremo passando in rassegna una serie di proposte la cui confutazione richiedeva solo di ricorrere al formalismo standard o a fatti ben stabiliti."

Entanglement: segnali superluminali?

First Laser-Amplified Superluminal Hookup

FLASH¹—A Superluminal Communicator Based Upon a New Kind of Quantum Measurement

Nick Herbert²

Received January 15, 1982 Foundations of Physics

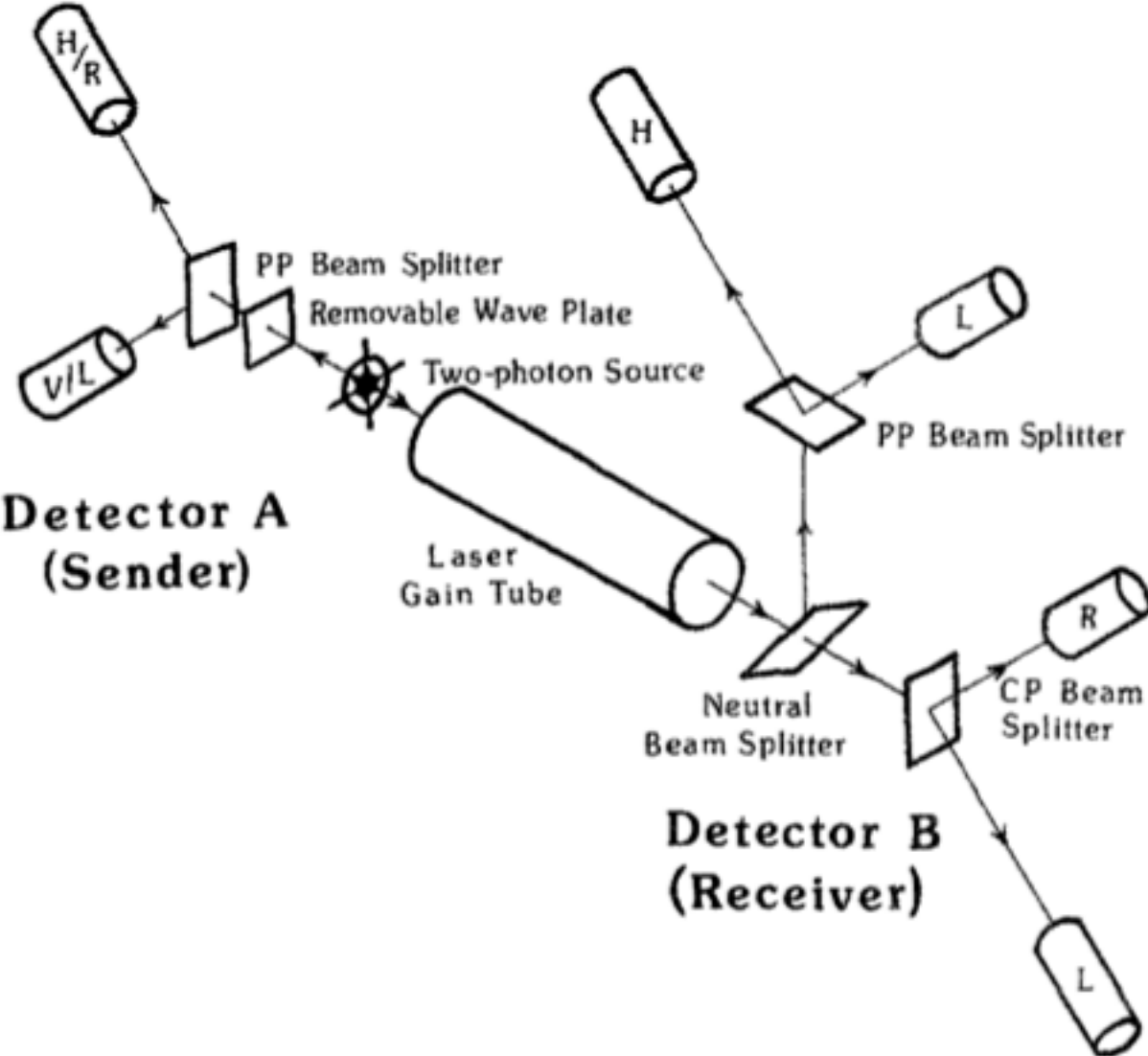
"Il teorema di Bell garantisce che due sistemi quantistici che hanno interagito in passato non possono più essere considerati come sistemi indipendenti. L'inseparabilità matematica della rappresentazione teorica quantistica è una parte essenziale della natura, non un semplice incidente del formalismo. Questi sistemi una volta che abbiano interagito - sistemi che in generale possono essere separati nello spazio, quindi veramente isolati secondo la relatività speciale - rimangono in un certo senso collegati in un modo non mediato, non mitigato e immediato. Se questa connessione quantistica istantanea fosse direttamente osservabile - piuttosto che verificata indirettamente tramite l'argomento di Bell - metterebbe la meccanica quantistica in conflitto con la relatività speciale, permettendo una segnalazione più veloce della luce."

Entanglement: segnali superluminali?

FLASH¹—A Superluminal Communicator Based Upon a New Kind of Quantum Measurement

Nick Herbert²

Received January 15, 1982 *Foundations of Physics*



N.B. Non entriamo nel dettaglio dell'apparato perché ne vedremo una versione semplificata. Rimandiamo comunque alla bibliografia

...Questo fotone è amplificato dal tubo di amplificazione in N fotoni polarizzati V che sono separati dal beam splitter neutro in due pacchetti di circa N/2 fotoni ciascuno...

È implicito il riferimento alla possibilità di clonare stati!!!

Entanglement

Entanglement, Nonlocality, Superluminal Signaling and Cloning

GianCarlo Ghirardi*

Emeritus, University of Trieste,

The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste.

*"L'articolo FLASH è stato inviato per il referee a A. Peres e a me. La risposta di Peres è stata piuttosto particolare: **"ho raccomandato all'editore di pubblicare questo articolo. Scrissi che era evidentemente sbagliato, ma mi aspettavo che avrebbe suscitato un notevole interesse e che trovare l'errore avrebbe portato a significativi progressi nella nostra comprensione della fisica"**. Ero anche piuttosto preoccupato per varie ragioni. Non ero un esperto di laser ed ero informato che A. Gozzini e R. Peierls stavano cercando di confutare la conclusione di Herbert invocando il rumore inevitabile che colpisce il laser e che inibisce il suo funzionamento desiderato. D'altra parte, ero convinto che la teoria quantistica nella sua formulazione generale e non a causa di limitazioni di natura pratica avrebbe reso impraticabile la proposta di Herbert. Dopo essermi preoccupato per alcuni giorni di questo problema ho ottenuto la risposta generale: mentre è possibile concepire un apparato ideale che clona due stati ortogonali con il 100% di efficienza, lo stesso apparato, se la teoria quantistica lineare governa il suo funzionamento, non può clonare stati che sono combinazione lineare dei precedenti. Ecco la mia argomentazione, sulla base della quale ho raccomandato il rifiuto dell'articolo di Herbert."*

"Questo è un resoconto di come l'ingegnosa, ma errata, proposta di Herbert mi ha portato ad essere il primo a derivare il teorema di non clonazione. Circa un anno e mezzo dopo Wootters e Zurek e Dieks derivarono indipendentemente lo stesso risultato e lo pubblicarono. Il teorema è di notevole importanza nella teoria quantistica, è diventato noto come "Il teorema di non clonazione" ed è stato citato un numero innumerevole di volte. Solo successivamente mi resi conto che era stato un errore da parte mia non pubblicare il mio risultato. Ho discusso la mia precisa argomentazione con Gozzini e Peierls, inviando loro una bozza che era una sorta di ripetizione della mia relazione di referee e l'ho successivamente pubblicata in collaborazione con il mio collaboratore, T. Weber."

Teorema di non clonazione

LETTERS TO NATURE

A single quantum cannot be cloned

W. K. Wootters*

Center for Theoretical Physics, The University of Texas at Austin,
Austin, Texas 78712, USA

W. H. Zurek

Theoretical Astrophysics 130-33, California Institute of Technology,
Pasadena, California 91125, USA

"Se un fotone di polarizzazione definita incontra un atomo eccitato, c'è tipicamente qualche probabilità che l'atomo emetta un secondo fotone per emissione stimolata. Tale fotone è garantito avere la stessa polarizzazione del fotone originale. Ma è possibile con questo o qualsiasi altro processo amplificare uno stato quantico, cioè produrre diverse copie di un sistema quantico (il fotone polarizzato nel caso in questione), ognuna delle quali ha lo stesso stato dell'originale? Se lo fosse, il processo di amplificazione potrebbe essere utilizzato per accertare lo stato esatto di un sistema quantistico: nel caso di un fotone, si potrebbe determinare la sua polarizzazione producendo prima un fascio di copie identicamente polarizzate e poi misurando i parametri di Stokes. Mostriamo qui che la linearità della meccanica quantistica proibisce tale replica e che questa conclusione vale per tutti i sistemi quantistici."

Teorema di non clonazione

Teorema: non è possibile costruire una macchina che operi una trasformazione unitaria e sia in grado di clonare un generico stato di un qubit.

dim: esista una macchina in grado di clonare i qubit $|0\rangle$ e $|1\rangle$

$$U : |0\rangle \mapsto |0\rangle|0\rangle$$

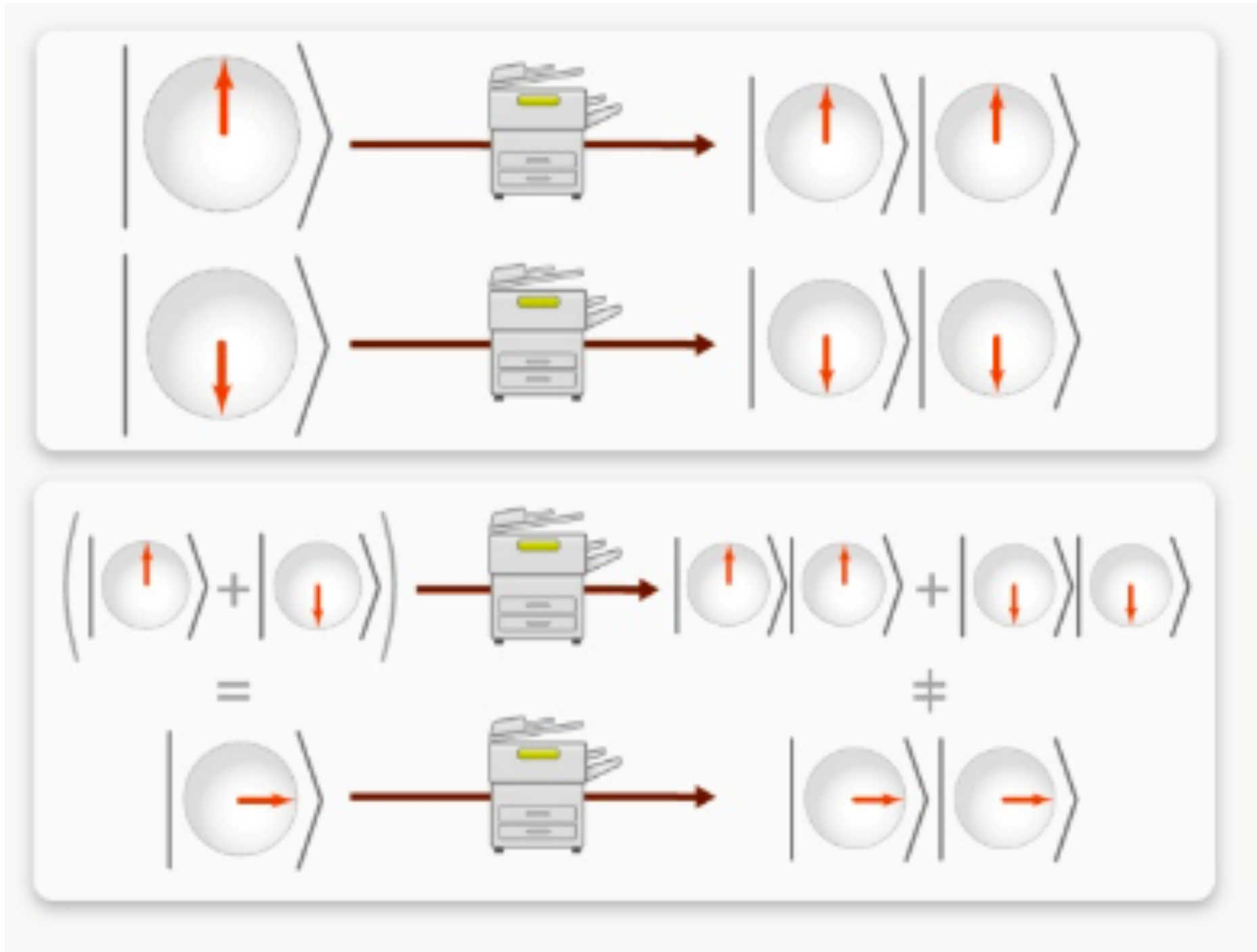
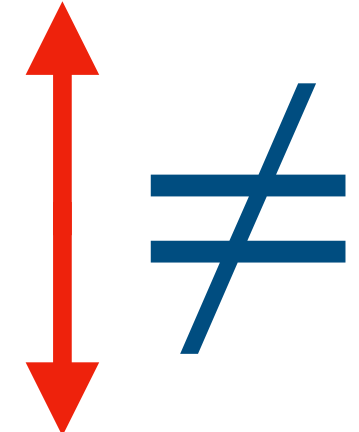
$$U : |1\rangle \mapsto |1\rangle|1\rangle$$

allora scelto $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$ otteniamo $U|\psi\rangle = |\psi\rangle|\psi\rangle$ da cui

$$U|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) = \frac{1}{2}(|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle)$$

D'altronde per linearità della teoria

$$U|\psi\rangle = U\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(U|0\rangle + U|1\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$



Teorema di non clonazione

LETTERS TO NATURE

A single quantum cannot be cloned

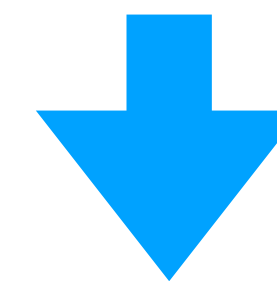
W. K. Wootters*

Center for Theoretical Physics, The University of Texas at Austin,
Austin, Texas 78712, USA

W. H. Zurek

Theoretical Astrophysics 130-33, California Institute of Technology,
Pasadena, California 91125, USA

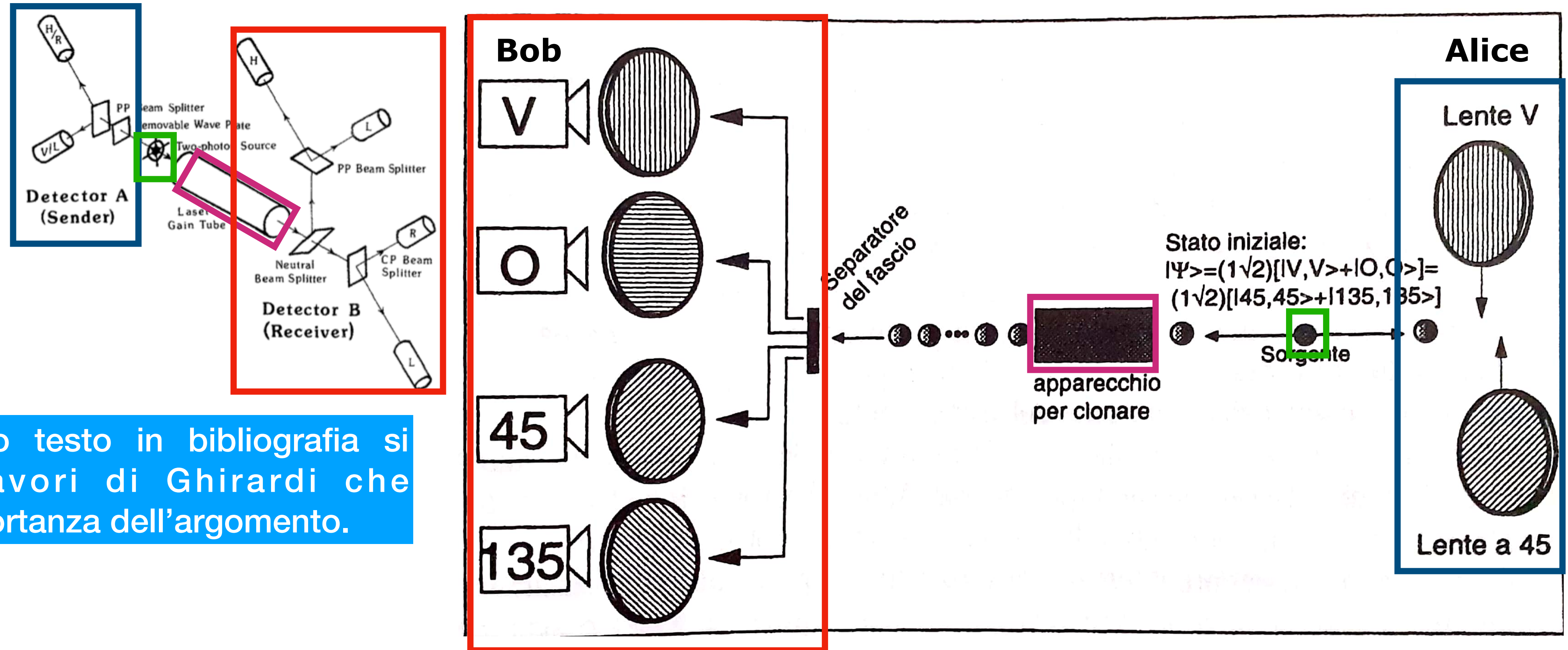
“Quindi non esiste un apparecchio che amplifichi una polarizzazione arbitraria. L'argomento di cui sopra non esclude la possibilità di un dispositivo che possa amplificare due polarizzazioni speciali, come quella verticale e quella orizzontale. Infatti, qualsiasi dispositivo di misurazione che distingue tra queste due polarizzazioni, un prisma di Nicol per esempio, potrebbe essere usato per innescare una tale amplificazione. Lo stesso argomento può essere applicato a qualsiasi altro tipo di sistema quantistico. Come nel caso dei fotoni, la linearità non proibisce l'amplificazione di qualsiasi stato dato da un dispositivo progettato appositamente per quello stato, ma esclude l'esistenza di un dispositivo capace di amplificare uno stato arbitrario.”



Riletto nella dimostrazione: possiamo costruire una macchina in grado di clonare una coppia di stati ortogonali ($|0\rangle$ e $|1\rangle$ ad esempio), ma il teorema esclude la possibilità di clonare uno stato arbitrario.

No-cloning e segnali superluminali (polarizzazione)

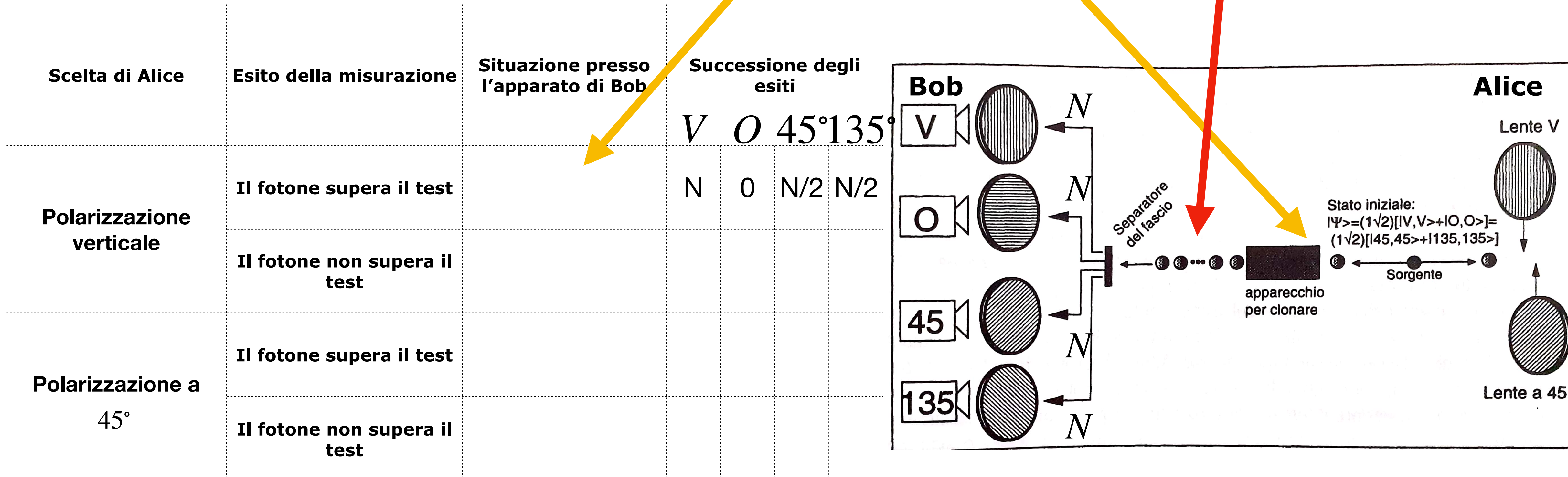
Una conseguenza del teorema di non clonazione è l'impossibilità di inviare segnali superluminali o meglio, se esistesse una macchina in grado di clonare stati generici, l'informazione potrebbe essere trasmessa più veloce della luce, violando il principio di causalità relativistico.



Oltre al già citato testo in bibliografia si trovano altri lavori di Ghirardi che testimoniano l'importanza dell'argomento.

No-cloning e segnali superluminali (polarizzazione)

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|V, V\rangle + |O, O\rangle) \mapsto |V, V\rangle \mapsto 4N \text{ fotoni } |V, V\rangle$$



No-cloning e segnali superluminali (polarizzazione)

Scelta di Alice	Esito della misurazione	Situazione presso l'apparato di Bob	Successione degli esiti			
			V	O	45°	135°
Polarizzazione verticale	Il fotone supera il test	Quattro fasci di elettroni V	N	0	N/2	N/2
	Il fotone non supera il test	Quattro fasci di elettroni O	0	N	N/2	N/2
Polarizzazione a 45°	Il fotone supera il test	Quattro fasci di elettroni 45	N/2	N/2	N	0
	Il fotone non supera il test	Quattro fasci di elettroni 135	N/2	N/2	0	N

Ora si riscontra che nei primi due casi 0 e 1 si verificano nei primi due posti della successione, mentre nel terzo e quarto caso nel terzo e nel quarto posto della successione. Se Alice sceglie liberamente quale delle due misure eseguire, la sua scelta determinerà se Bob otterrà una delle prime due o delle ultime due quaterne. Quindi se Alice ha scelto V Bob lo saprà perché registrerà lo 0 in uno dei due primi contatori; altrimenti avrà scelto la misura 45°. Questo permetterebbe ad Alice di codificare un messaggio e comunicarlo istantaneamente a Bob. Il teorema di non clonazione rende impossibile tale processo.

Dense-coding

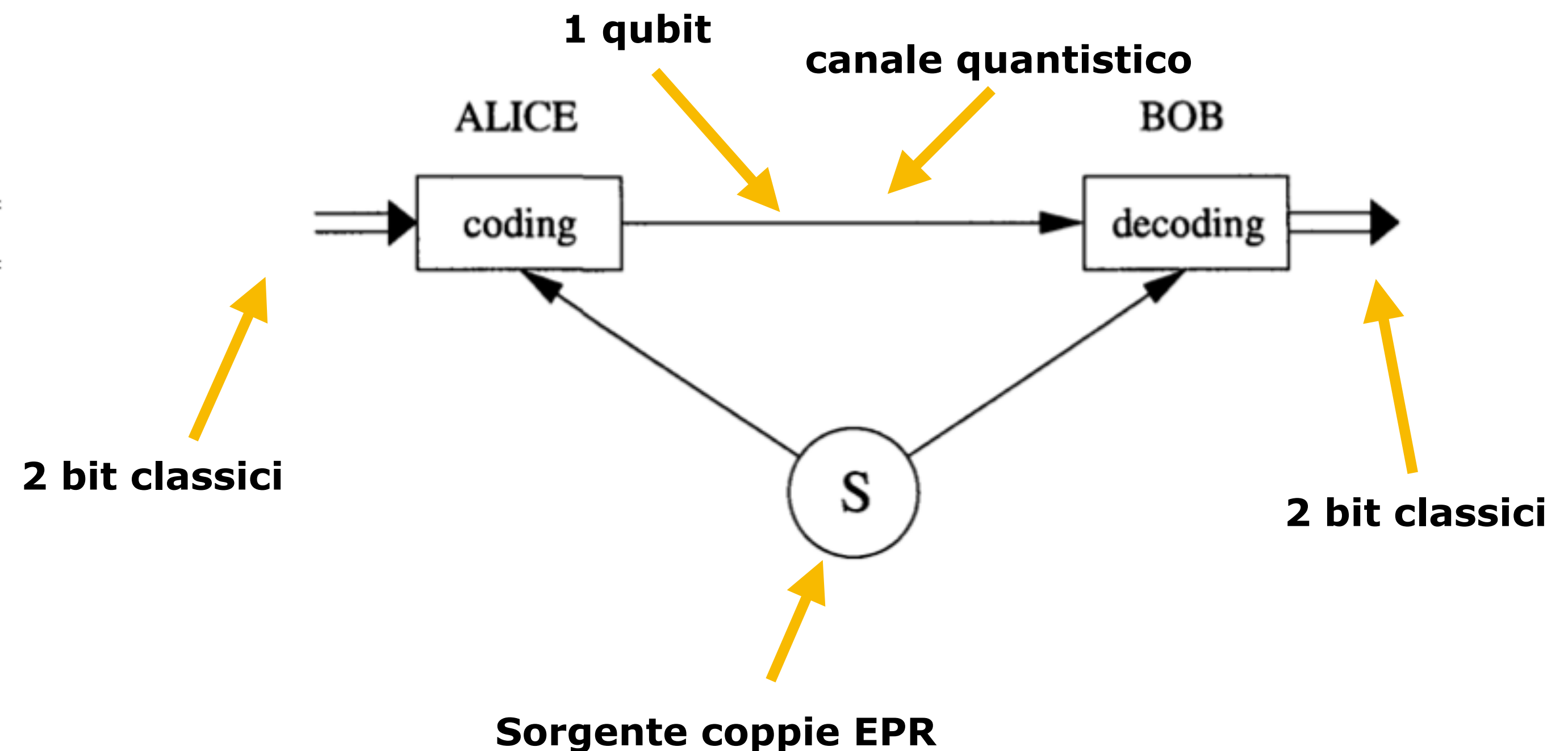
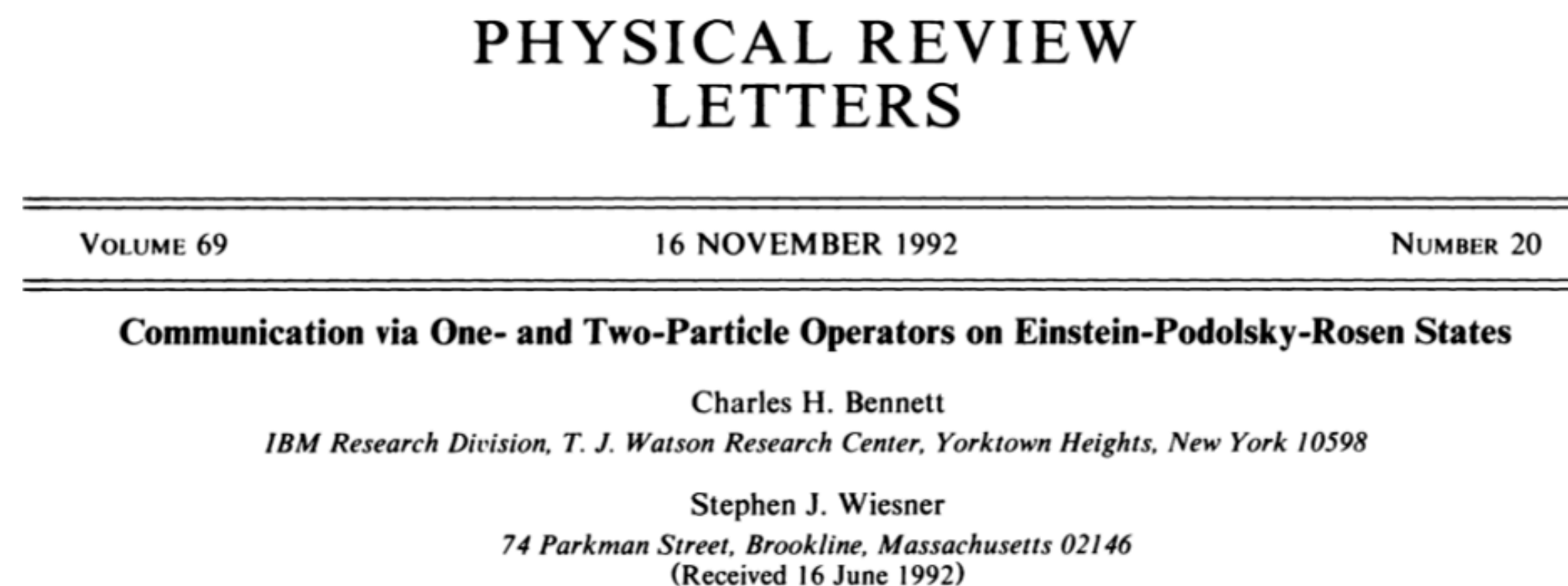
Immaginiamo che Alice voglia comunicare a Bob due bit di informazione classica per mezzo di un canale quantistico. Un modo per farlo, ipotizzando la comunicazione perfettamente efficiente e senza rumore, potrebbe essere quello che banalmente associa al bit 0 il qubit $|0\rangle$ e al bit 1 quello $|1\rangle$, realizzata sperimentalmente ad esempio mediante la polarizzazione di un fotone. In questo caso Alice potrebbe condividere i due qubit in modo analogo a quanto farebbe per i bit e Bob effettuare la misura nella base computazionale. In questo caso la comunicazione mediante canale quantistico avrebbe le stesse caratteristiche di quella classica. In generale si potrebbe dimostrare che inviando un qubit alla volta, non importa come lo prepara Alice e non importa come Bob lo misuri, non più di un bit classico può essere trasportato da ogni qubit (anche se i qubit sono entangled l'uno con l'altro).

Ad esempio un canale quantistico può essere composto da :

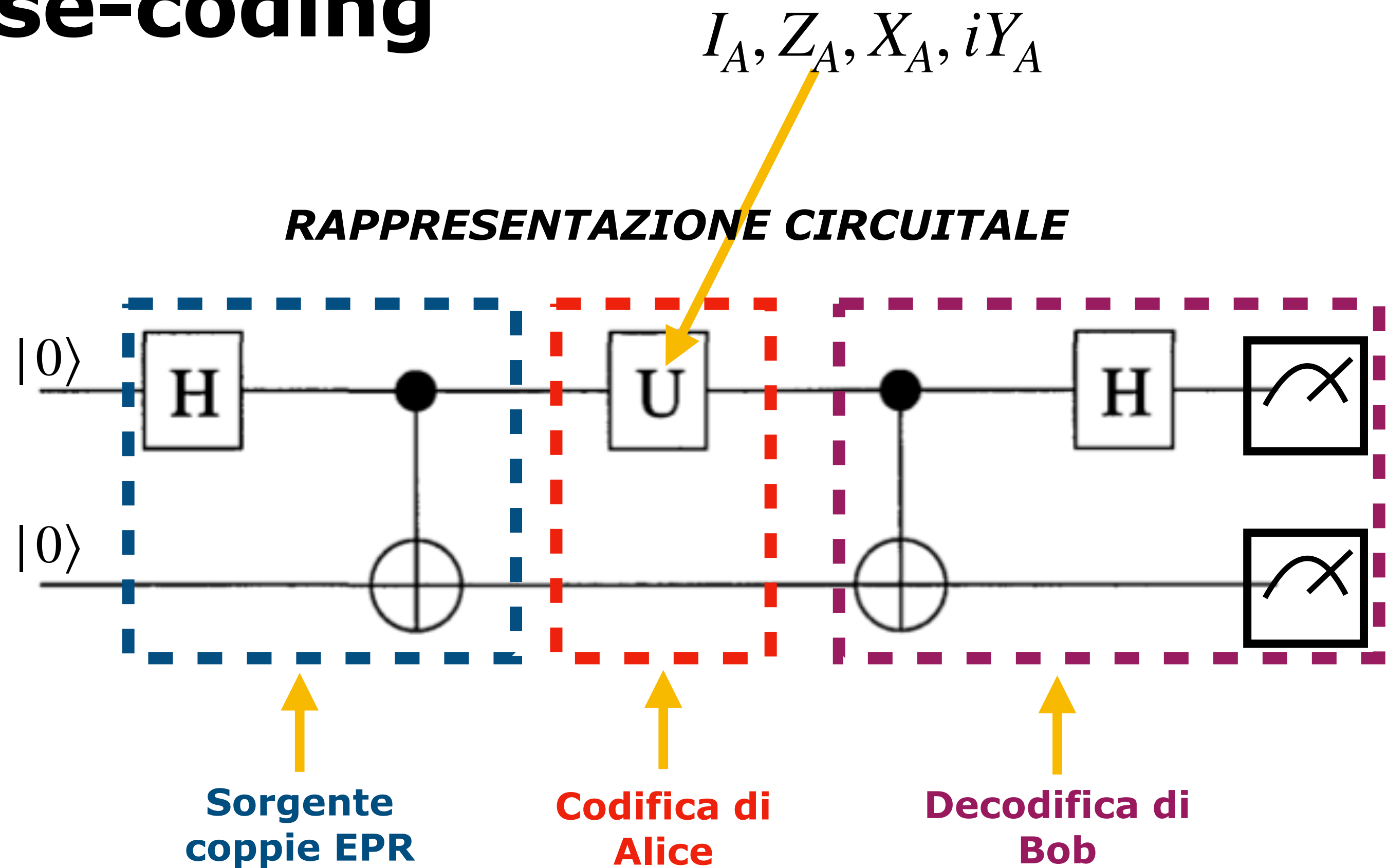
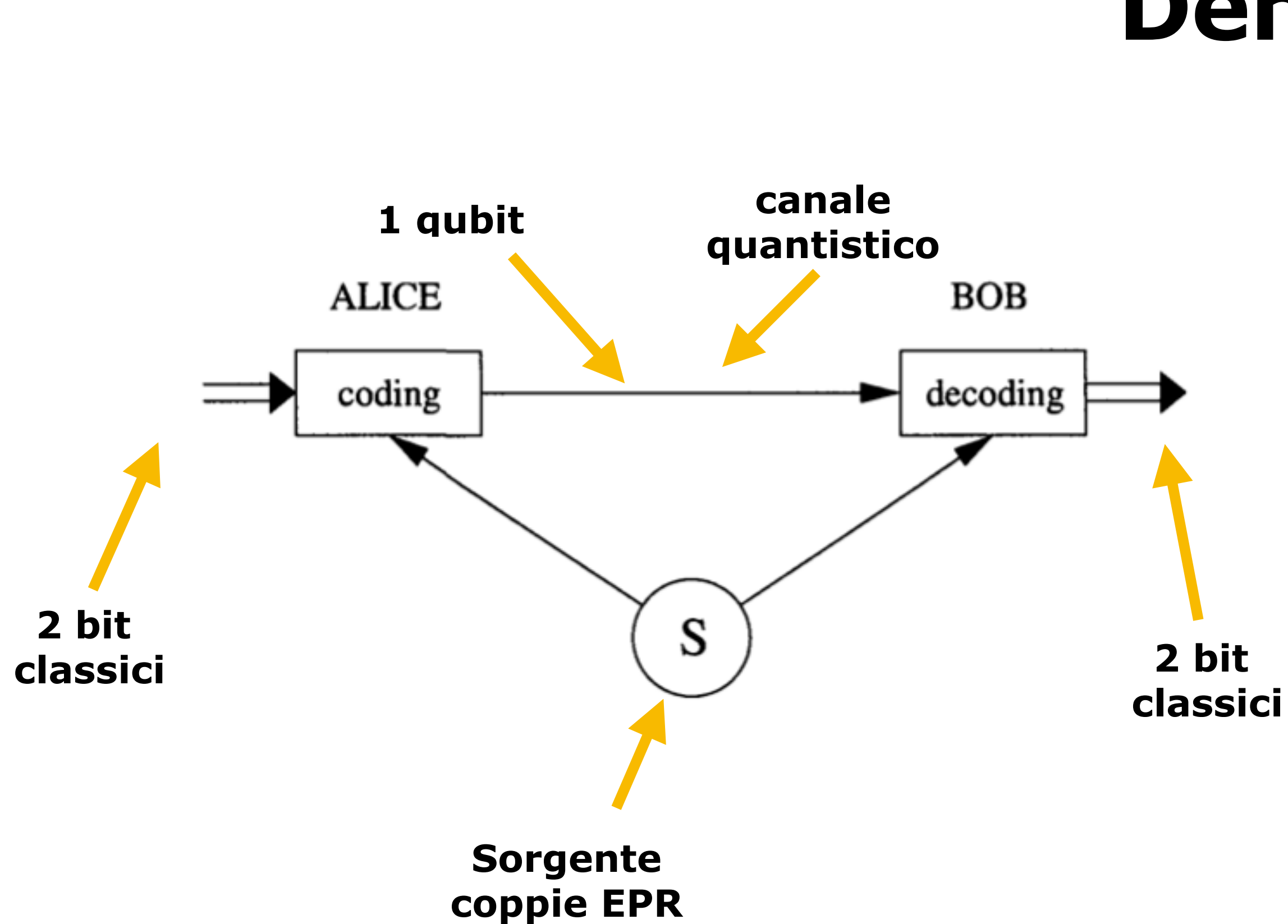
- un dispositivo ottico di emissione capace di produrre fotoni polarizzati in una delle quattro configurazioni possibili (H, V, 45° e 135°)
- un cavo (es. fibra ottica) su cui viaggiano i fotoni
- un dispositivo che permetta all'utente destinatario di misurare la polarizzazione dei fotoni.

Dense-coding

Consideriamo una sorgente di coppie EPR che invii ad Alice un qubit e a Bob l'altro della coppia. Alice può codificare i propri due bit classici grazie alla proprietà che uno stato massimamente entangled di Bell può essere trasformato in uno qualsiasi degli altri tre facendo agire localmente una delle quattro matrici di Pauli (Identità compresa). In questo modo Alice può inviare il proprio qubit a Bob il quale a questo punto esegue una misura nella base di Bell e ottiene in questo modo la decodifica dell'informazione inviata da Alice.



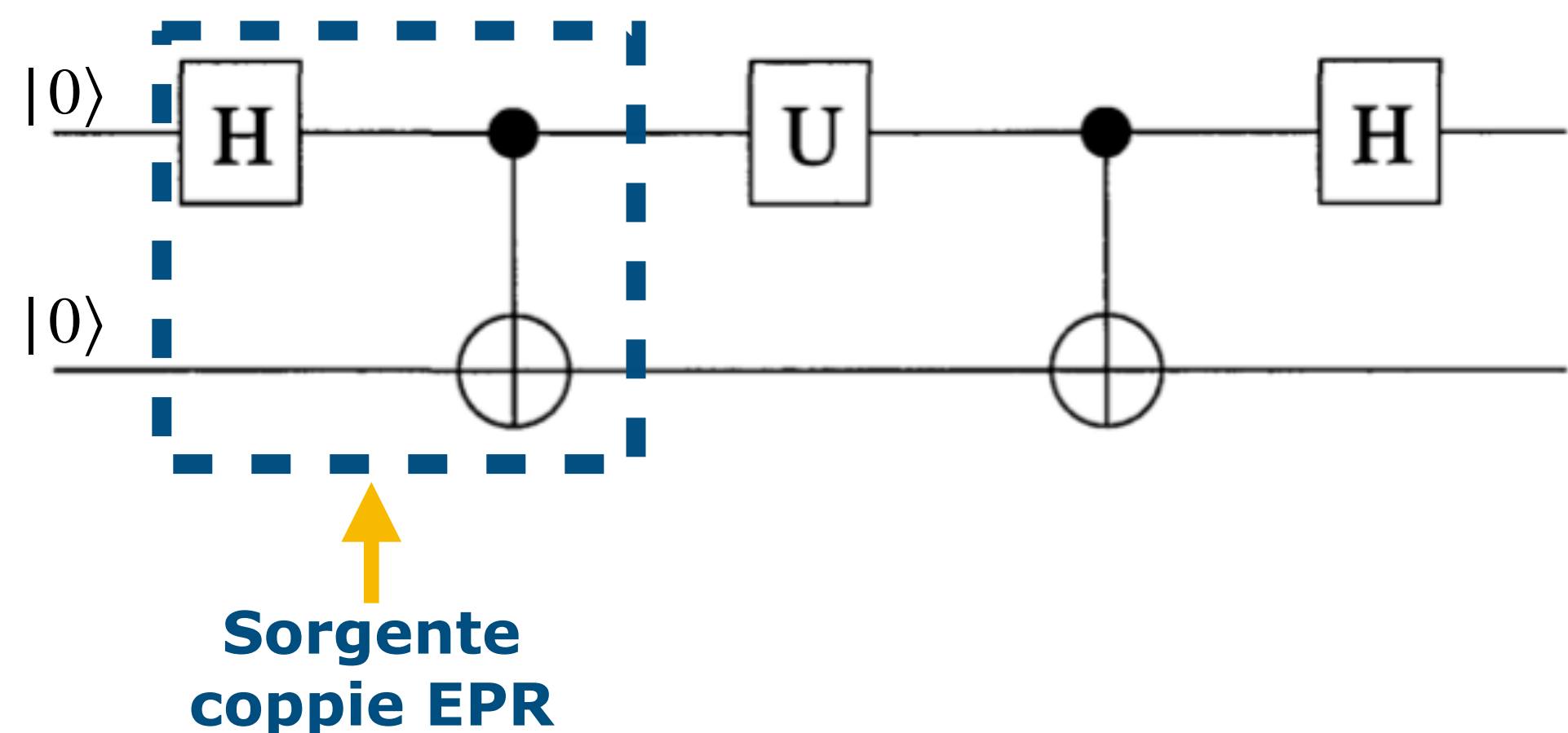
Dense-coding



Consideriamo una sorgente di coppie EPR che invii ad Alice un qubit e a Bob l'altro della coppia. Alice può codificare i propri due bit classici grazie alla proprietà che uno stato massimamente entangled di Bell può essere trasformato in uno qualsiasi degli altri tre facendo agire localmente una delle quattro matrici di Pauli (Identità compresa). In questo modo Alice può inviare il proprio qubit a Bob il quale a questo punto esegue una misura nella base di Bell e ottiene in questo modo la decodifica dell'informazione inviata da Alice.

Dense-coding

Stati di Bell



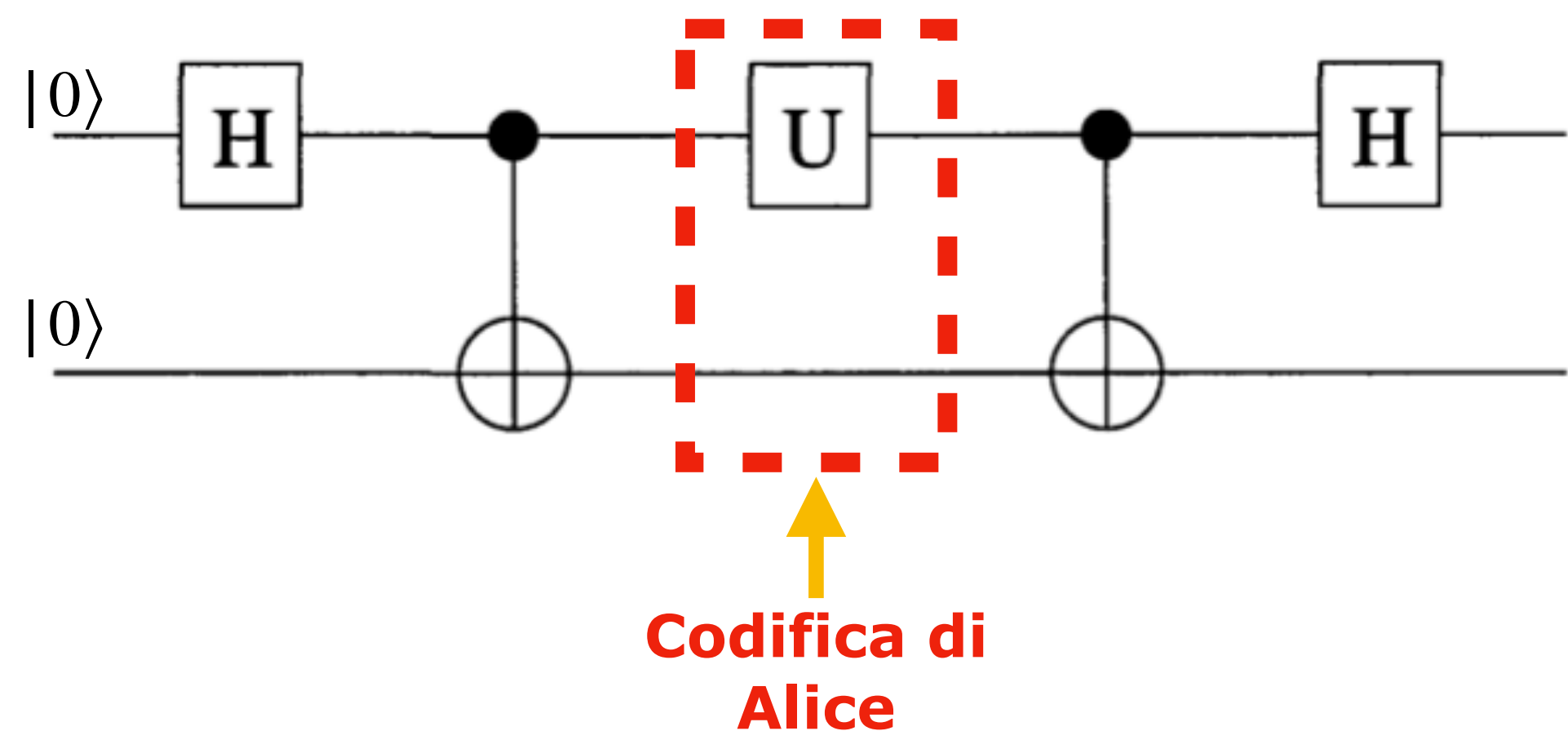
$$\begin{aligned}
 |00\rangle &\mapsto |\psi_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle), \\
 |01\rangle &\mapsto |\psi_{01}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle), \\
 |10\rangle &\mapsto |\psi_{10}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle), \\
 |11\rangle &\mapsto |\psi_{11}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle).
 \end{aligned}$$

Sorgente EPR: $|0\rangle|0\rangle \xrightarrow{CNOT(H \otimes I)} |\psi_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_A|0\rangle_B + |1\rangle_A|1\rangle_B)$

La coppia di particelle entangled viene separata: una data ad Alice e una a Bob

Dense-coding

Stati di Bell

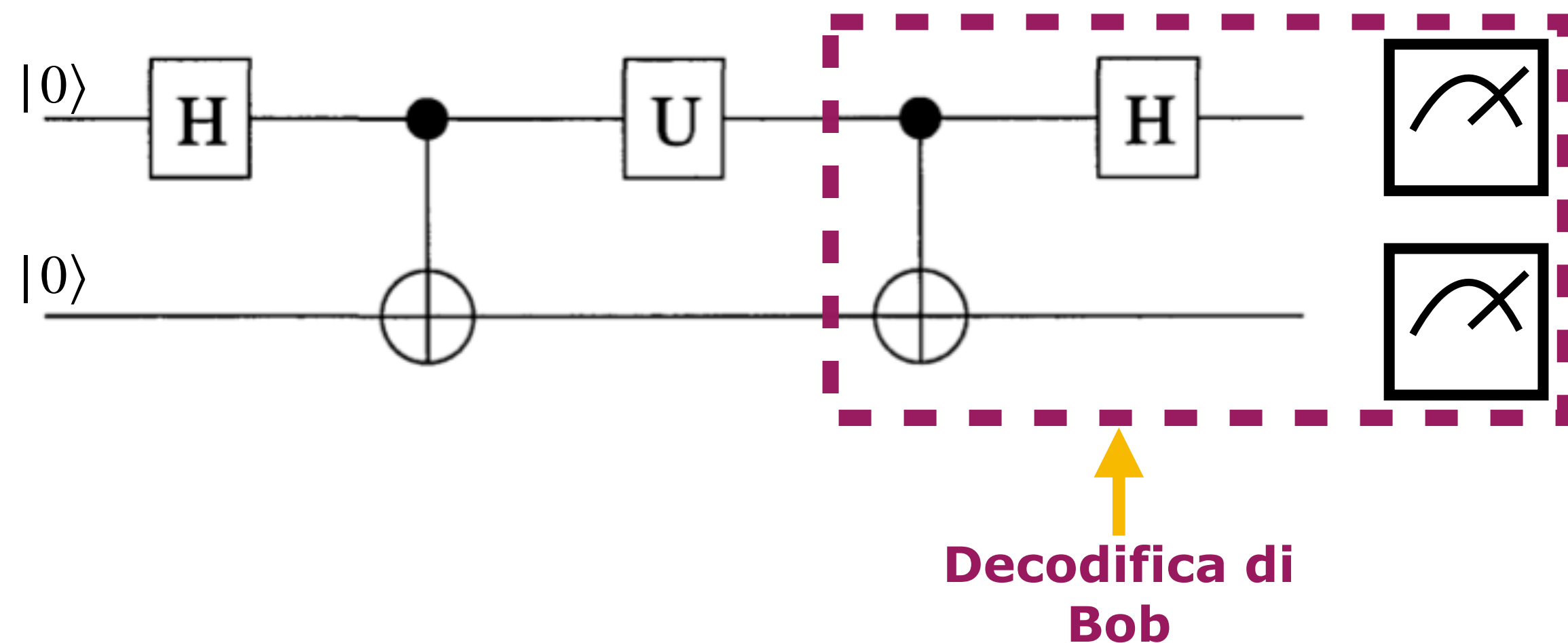


$$\begin{aligned}
 |00\rangle &\mapsto |\psi_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle), \\
 |01\rangle &\mapsto |\psi_{01}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle), \\
 |10\rangle &\mapsto |\psi_{10}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle), \\
 |11\rangle &\mapsto |\psi_{11}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle).
 \end{aligned}$$

Codifica di Alice: Alice può codificare i due bit classici sfruttando una trasformazione locale associata alle matrici di Pauli e inviare il qubit a Bob.

$$\begin{array}{ll}
 (0,0) & |\psi_{00}\rangle \xrightarrow{I \otimes I} |\psi_{00}\rangle \\
 (0,1) & |\psi_{00}\rangle \xrightarrow{X_A \otimes I} |\psi_{01}\rangle \\
 (1,0) & |\psi_{00}\rangle \xrightarrow{Z_A \otimes I} |\psi_{10}\rangle \\
 (1,1) & |\psi_{00}\rangle \xrightarrow{iY_A \otimes I} |\psi_{11}\rangle
 \end{array}$$

Dense-coding



Stati di Bell

$$\begin{aligned}
 |00\rangle &\mapsto |\psi_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle), \\
 |01\rangle &\mapsto |\psi_{01}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle), \\
 |10\rangle &\mapsto |\psi_{10}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle), \\
 |11\rangle &\mapsto |\psi_{11}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle).
 \end{aligned}$$

Decodifica di Bob: a questo punto Bob possiede entrambe le particelle della coppia EPR: la propria e quella inviata da Alice. Effettua una misura e ritrova due bit codificati da Alice

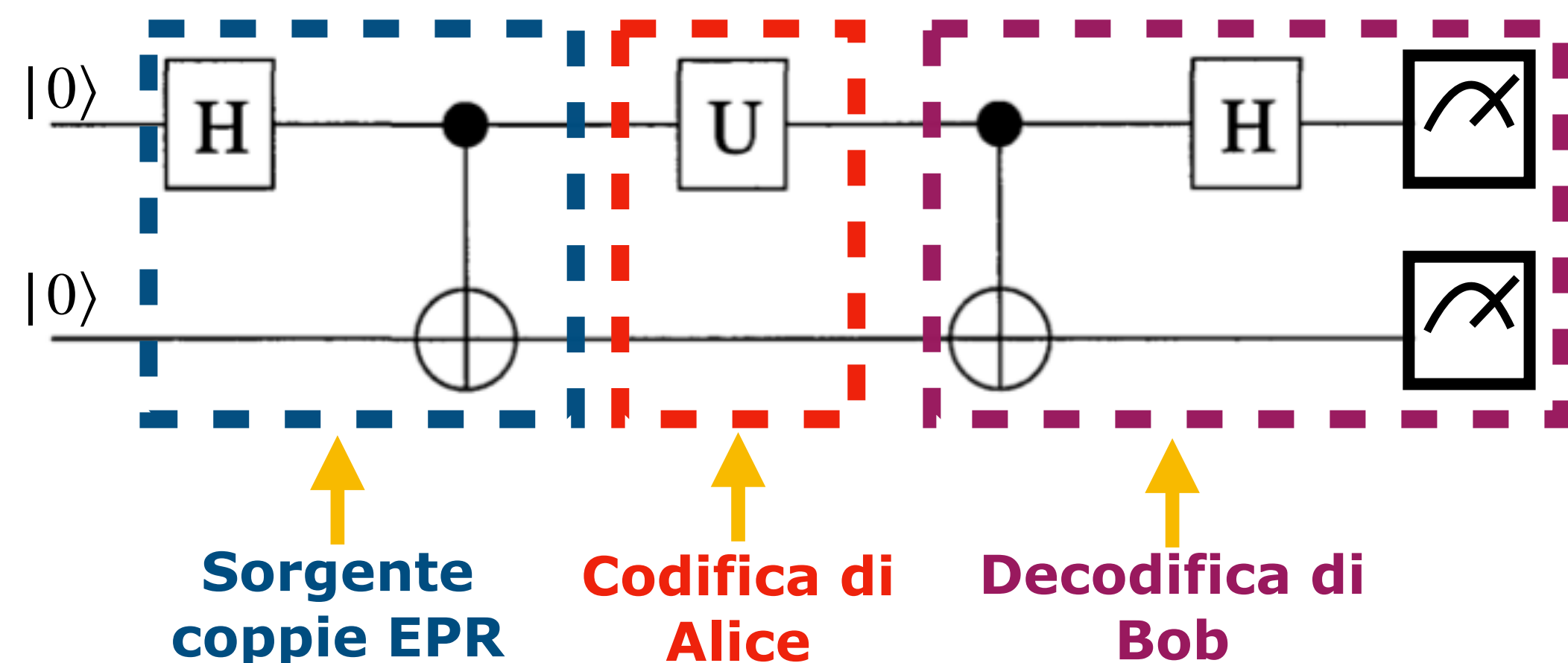
$$|\psi_{00}\rangle \xrightarrow{(H \otimes I)CNOT} |00\rangle \xrightarrow{\text{misura}} (0,0)$$

$$|\psi_{10}\rangle \xrightarrow{(H \otimes I)CNOT} |10\rangle \xrightarrow{\text{misura}} (1,0)$$

$$|\psi_{01}\rangle \xrightarrow{(H \otimes I)CNOT} |01\rangle \xrightarrow{\text{misura}} (0,1)$$

$$|\psi_{11}\rangle \xrightarrow{(H \otimes I)CNOT} |11\rangle \xrightarrow{\text{misura}} (1,1)$$

Dense-coding



Una bella caratteristica di questo protocollo è che se il messaggio è altamente confidenziale, Alice non deve preoccuparsi che una spia intercetti il qubit trasmesso e decifri il suo messaggio. Infatti **tutte le informazioni sono nelle correlazioni tra le misurazioni dei qubit A e B** e questa informazione è inaccessibile a meno che la spia non sia in grado di ottenere entrambi i membri della coppia entangled.

Da un certo punto di vista, Alice e Bob avevano davvero bisogno di usare il canale due volte per scambiarsi due informazioni. Ad esempio, possiamo immaginare che Alice abbia preparato lei stessa lo stato $|\psi_{00}\rangle$. L'anno scorso ha mandato metà dello stato a Bob, e ora gli manda l'altra metà. Quindi, in effetti, Alice ha inviato due qubit a Bob in uno dei quattro stati reciprocamente ortogonali, per trasmettere due bit di informazione classici. Tuttavia, il dense-coding è piuttosto strano per diversi motivi:

1. Alice avrebbe in questo caso inviato il primo qubit a Bob molto prima di sapere quale sarebbe stato il suo messaggio;
2. ogni qubit da solo non trasporta alcuna informazione; tutte le informazioni sono codificate nelle correlazioni;
3. avrebbe funzionato altrettanto bene per Bob preparare la coppia entangled e mandarne metà ad Alice; quindi due bit classici vengono trasmessi da Alice a Bob inviando un singolo qubit da Bob ad Alice e uno da Alice a Bob.

Teletrasporto quantistico

PHYSICAL REVIEW
LETTERS

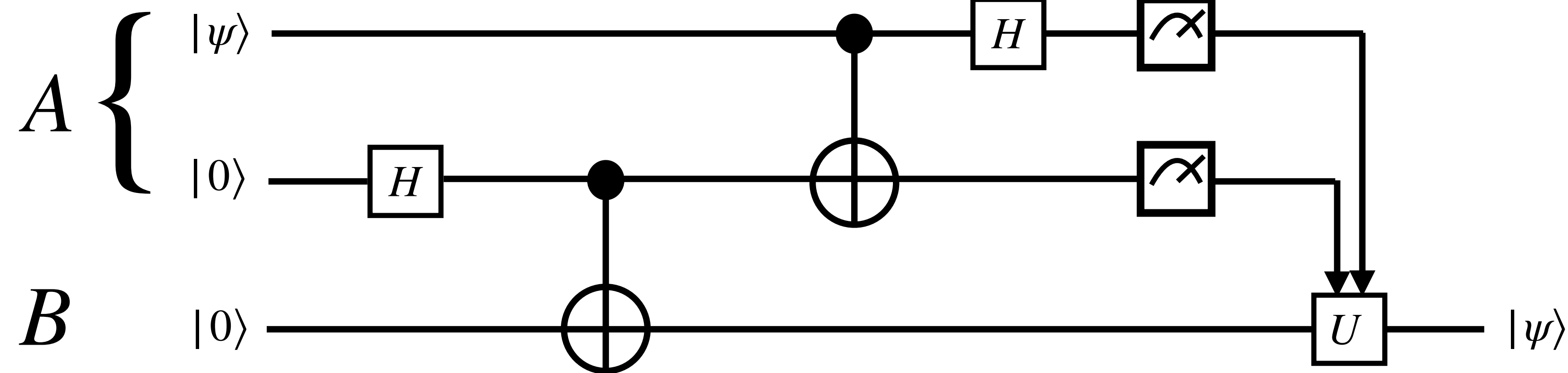
VOLUME 70

29 MARCH 1993

NUMBER 13

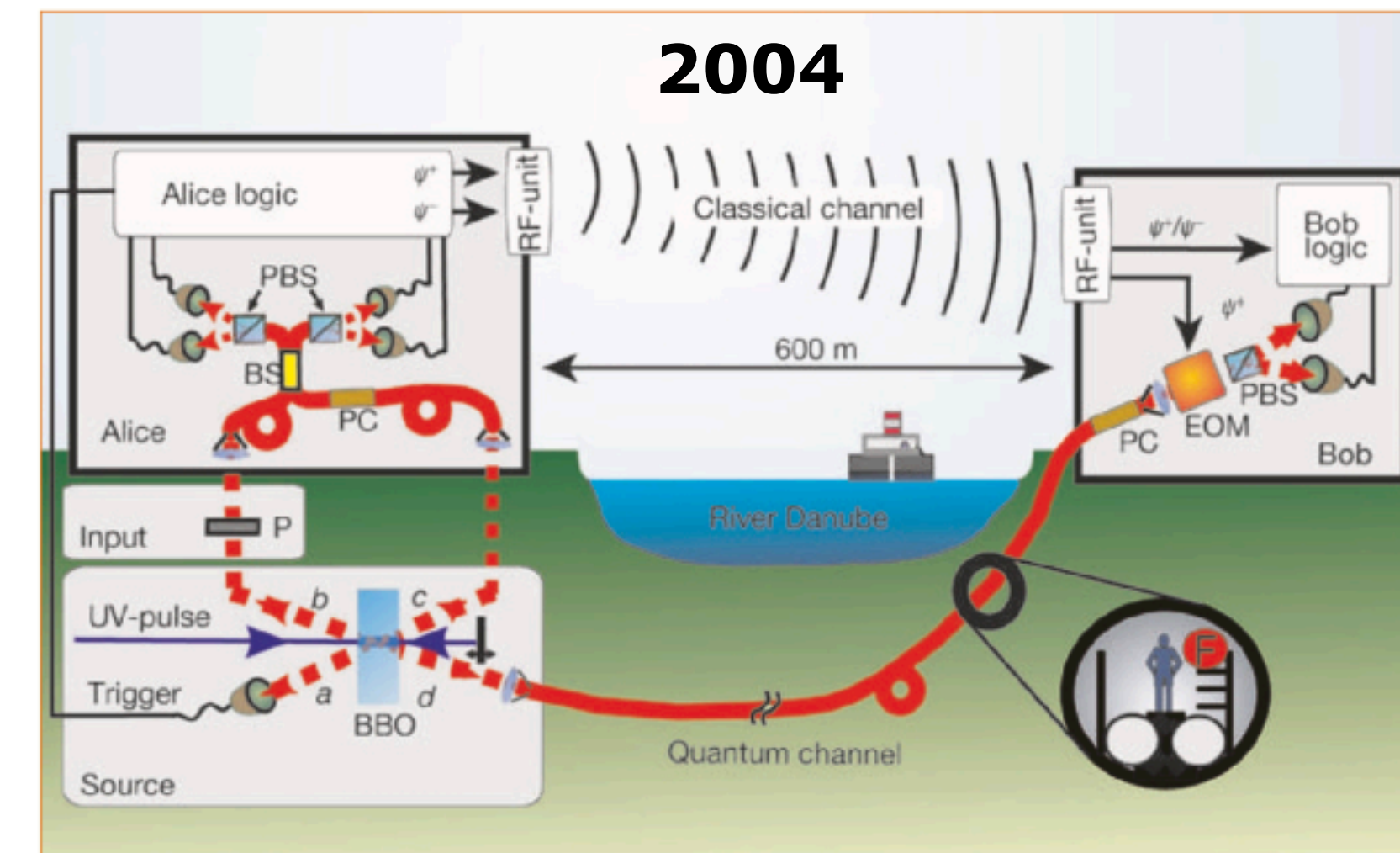
Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and
Einstein-Podolsky-Rosen Channels

Charles H. Bennett,⁽¹⁾ Gilles Brassard,⁽²⁾ Claude Crépeau,^{(2),(3)}
Richard Jozsa,⁽²⁾ Asher Peres,⁽⁴⁾ and William K. Wootters⁽⁵⁾



Quantum teleportation across the Danube

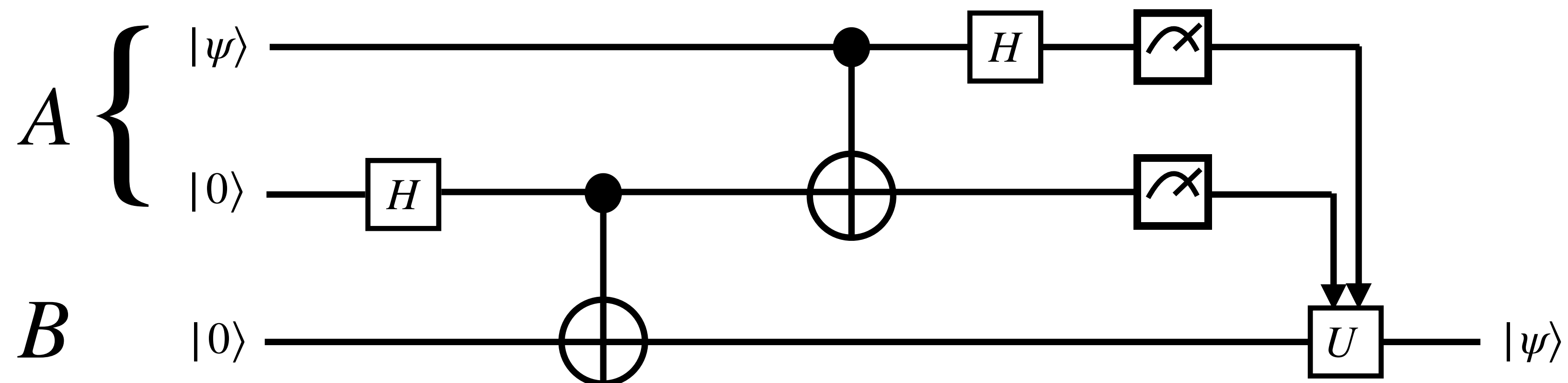
A real-world experiment marks a step towards worldwide quantum communication.



Teletrasporto quantistico

Alice e Bob si sono incontrati molto tempo fa ma ora vivono lontani. Mentre erano insieme hanno generato una coppia EPR, ognuno prendendo un qubit della coppia EPR quando si sono separati. Molti anni dopo, Bob si nasconde, e la missione di Alice, se dovesse scegliere di accettarla, è di consegnare un qubit ($|\psi\rangle$) a Bob. Lei non conosce lo stato del qubit, e inoltre può solo inviare informazioni classiche a Bob. Alice dovrebbe accettare la missione? (*Nielsen & Chuang*)

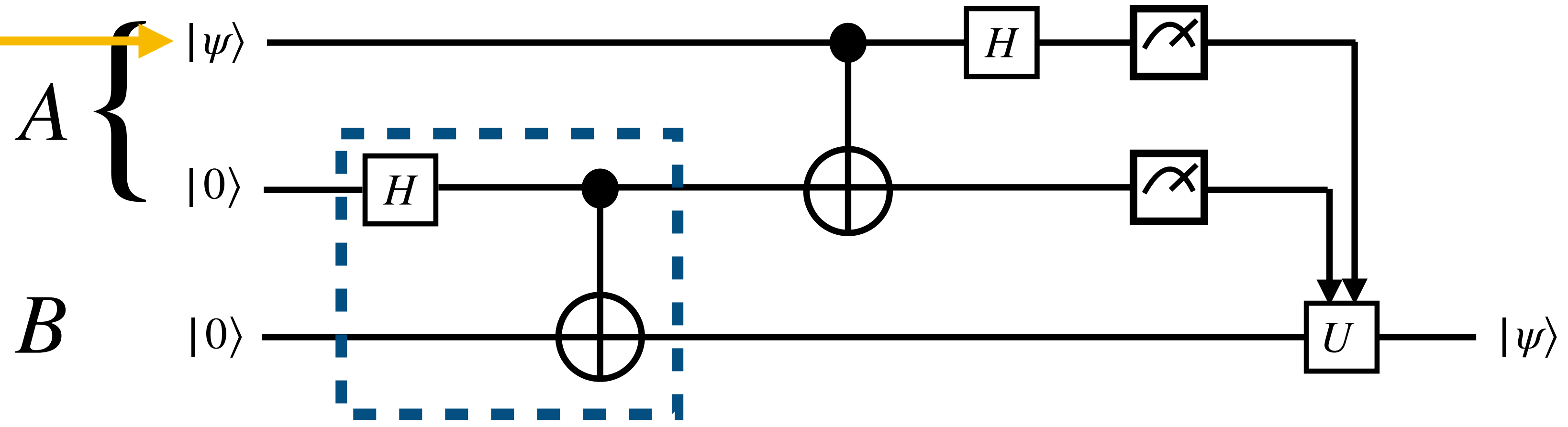
Intuitivamente, le cose sembrano abbastanza brutte per Alice. Non conosce lo stato $|\psi\rangle$ del qubit che deve inviare a Bob, e le leggi della meccanica quantistica le impediscono di determinare lo stato quando ha solo una singola copia di $|\psi\rangle$ in suo possesso. Non si mette bene per Alice. Fortunatamente per Alice, il teletrasporto quantistico è un modo di utilizzare la coppia EPR entangled per inviare $|\psi\rangle$ a Bob



Teletrasporto quantistico

Qubit da consegnare a Bob

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

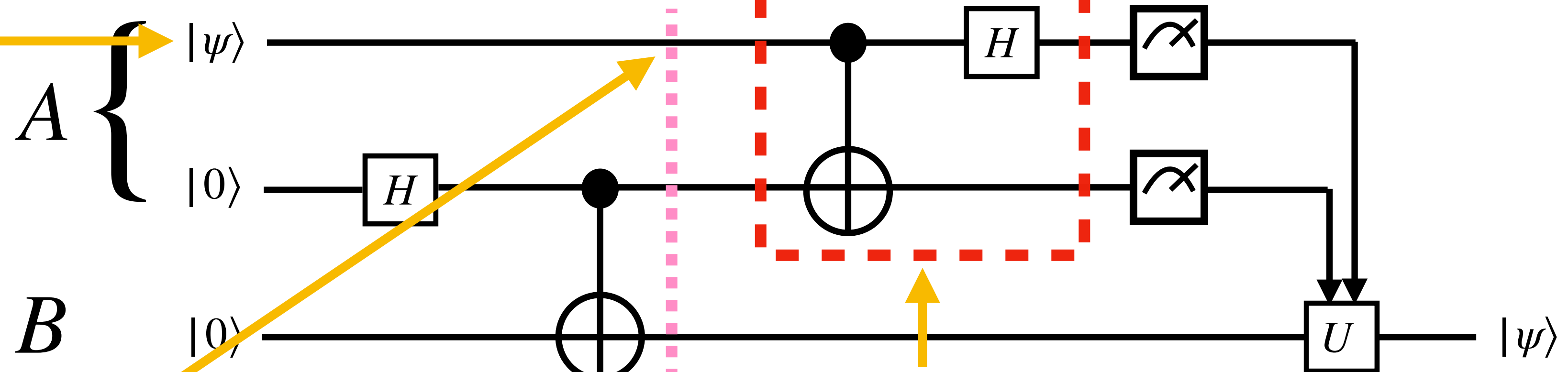


$$|\psi\rangle|0\rangle|0\rangle \longrightarrow |\psi_0\rangle = |\psi\rangle|\psi_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [\alpha|0\rangle(|00\rangle + |11\rangle) + \beta|1\rangle(|00\rangle + |11\rangle)]$$

Teletrasporto quantistico

Qubit da consegnare a Bob

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$



Interazione $|\psi\rangle$ con lo stato EPR di Alice (per una misurazione nella base di Bell)

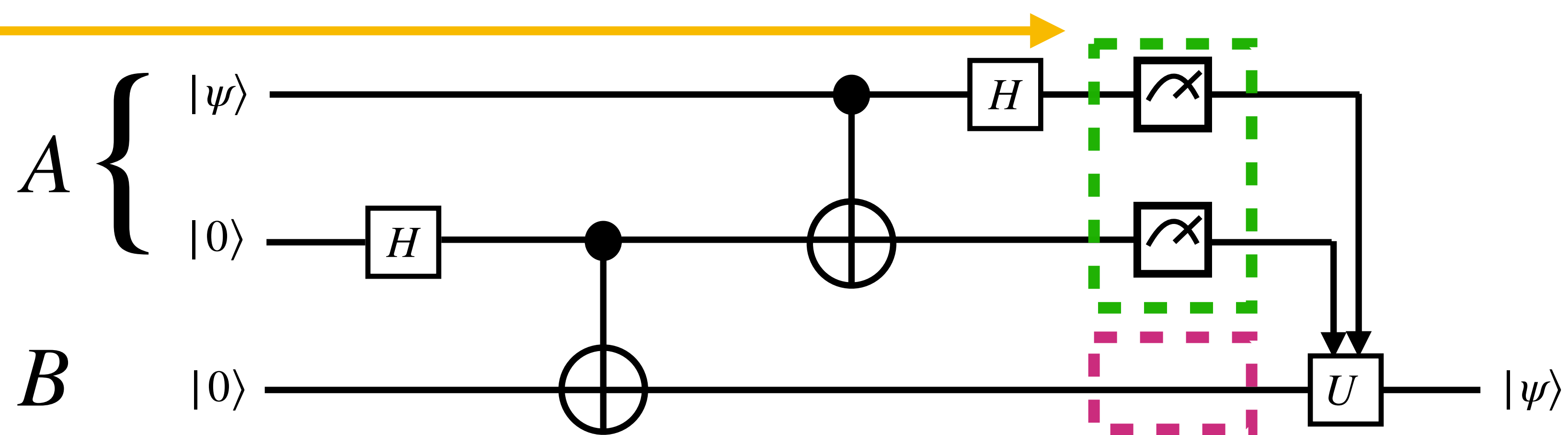
Se Alice facesse una misurazione a questo punto nella base computazionale lo stato $|\psi\rangle$ collasserebbe in $|0\rangle$ o in $|1\rangle$ e non potrebbe ricostruire lo stato.

$$\frac{1}{\sqrt{2}} [\alpha|0\rangle(|00\rangle + |11\rangle) + \beta|1\rangle(|00\rangle + |11\rangle)] \longrightarrow$$

$$|\psi_1\rangle = \frac{1}{2} [|00\rangle (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) + |01\rangle (\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle) + |10\rangle (\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle) + |11\rangle (\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle)]$$

Teletrasporto quantistico

Nel momento in cui A esegue la misurazione $|\psi\rangle$ collassa in uno dei due stati della base computazionale $|0\rangle$ o $|1\rangle$

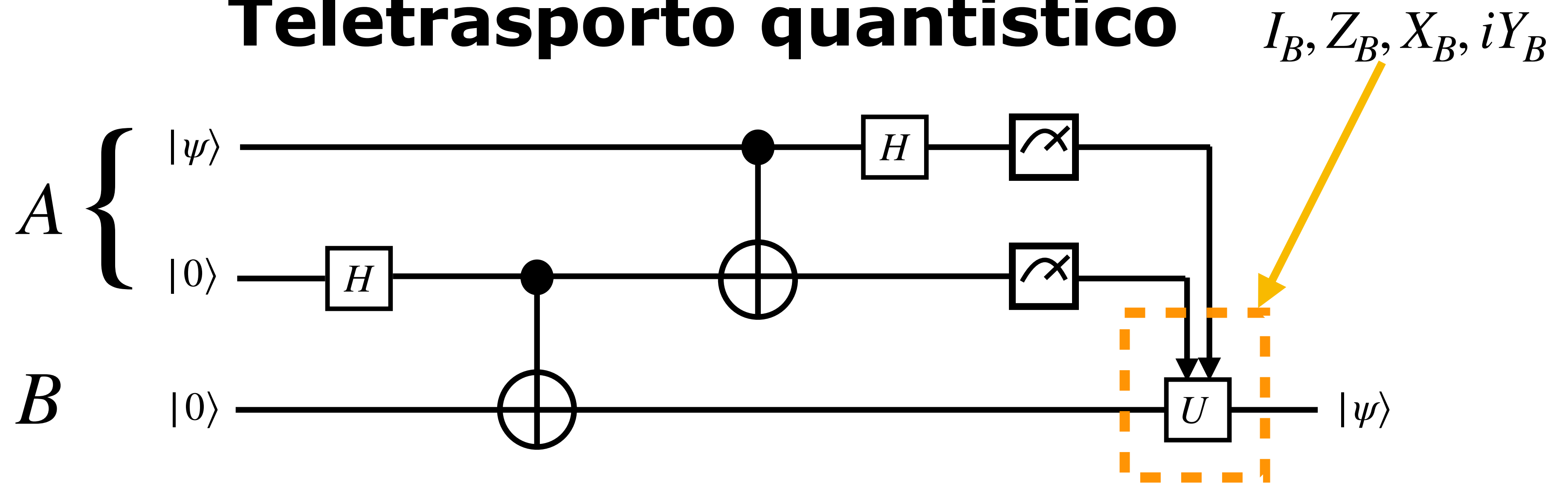


$$|\psi_1\rangle = \frac{1}{2} [|00\rangle (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) + |01\rangle (\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle) + |10\rangle (\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle) + |11\rangle (\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle)]$$

2 bit classici inviati da Alice a Bob

$$\left\{ \begin{array}{l} 00 \xrightarrow{p(00) = 0.25} |\psi_2(00)\rangle \equiv [\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle] \\ 01 \xrightarrow{p(01) = 0.25} |\psi_2(01)\rangle \equiv [\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle] \\ 10 \xrightarrow{p(10) = 0.25} |\psi_2(10)\rangle \equiv [\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle] \\ 11 \xrightarrow{p(11) = 0.25} |\psi_2(11)\rangle \equiv [\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle] \end{array} \right.$$

Teletrasporto quantistico

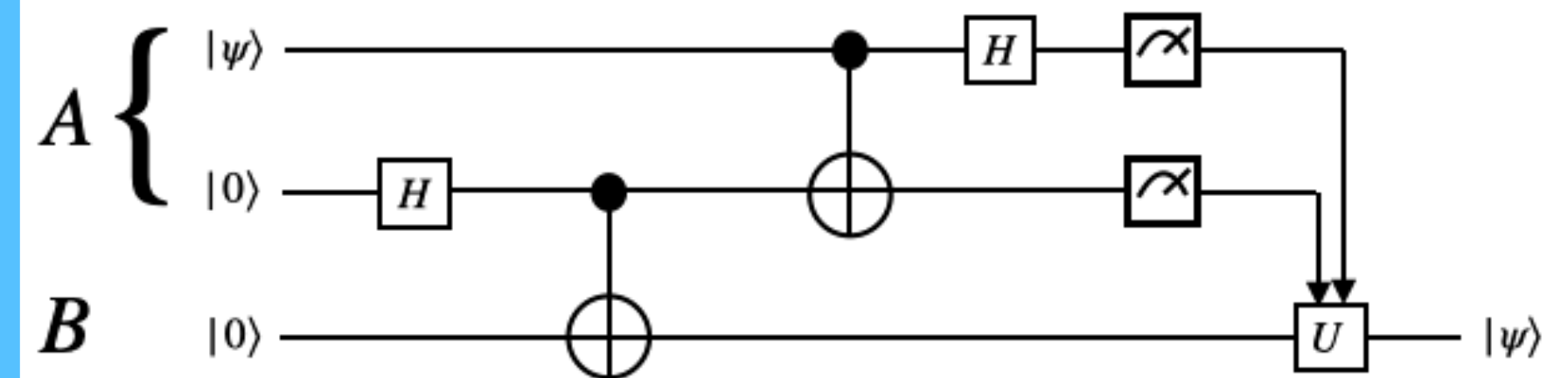


Bob in base ai due bit ricevuti sceglie uno dei quattro operatori unitari

00	$ \psi_2(00)\rangle \equiv [\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle]$	$\xrightarrow{I_B}$	$ \psi\rangle$	} Bob recupera lo stato $ \psi\rangle$
01	$ \psi_2(01)\rangle \equiv [\alpha 1\rangle + \beta 0\rangle]$	$\xrightarrow{X_B}$	$ \psi\rangle$	
10	$ \psi_2(10)\rangle \equiv [\alpha 0\rangle - \beta 1\rangle]$	$\xrightarrow{Z_B}$	$ \psi\rangle$	
11	$ \psi_2(11)\rangle \equiv [\alpha 1\rangle - \beta 0\rangle]$	$\xrightarrow{iY_B}$	$ \psi\rangle$	

Teletrasporto quantistico

Sottolineiamo che il teletrasporto non permette di comunicare informazioni quantistiche più velocemente della luce. Infatti, Alice deve inviare due bit di informazione classica per permettere a Bob di ricostruire lo stato $|\psi\rangle$. Questa informazione è trasmessa per via classica, ad una velocità non superiore a quella della luce.

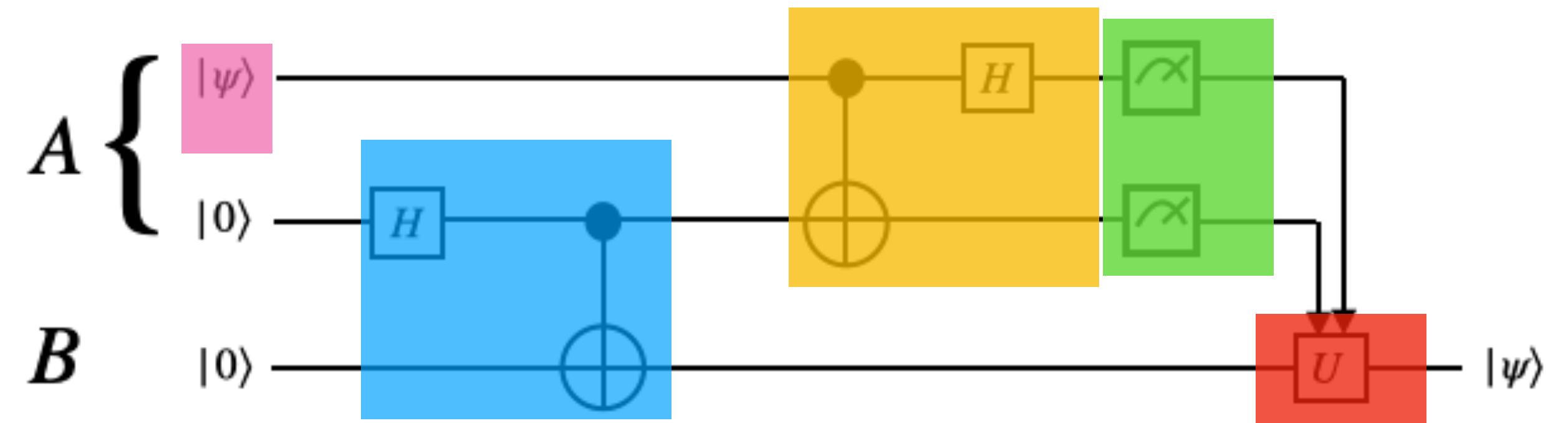
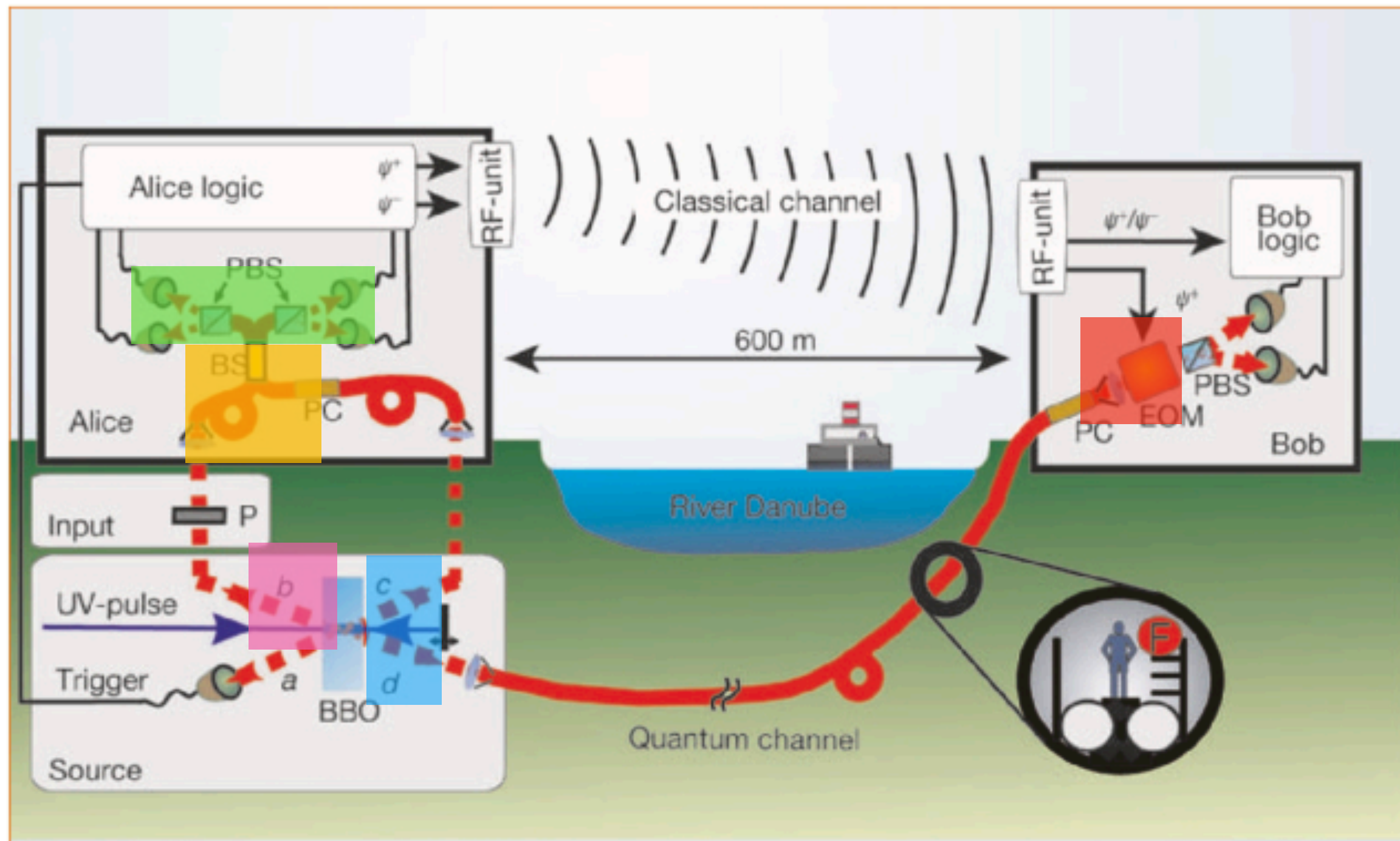


Si noti anche che è l'informazione sullo stato quantico, il qubit, che passa da Alice a Bob e non il sistema fisico stesso. I sistemi fisici che implementano il qubit possono essere molto diversi nei laboratori di Alice e Bob.

Sottolineiamo anche che il teletrasporto è pienamente coerente con il teorema di non clonazione. Lo stato quantico $|\psi\rangle$ è in possesso di Bob alla fine del processo di teletrasporto, ma lo stato originale è lasciato in $|0\rangle$ o $|1\rangle$, a seconda del risultato della misurazione di Alice. Lo stato quantico sconosciuto $|\psi\rangle$ svanisce in un posto e riappare in un altro.

"Il teletrasporto quantistico è una procedura curiosa. Inizialmente, il qubit di Bob è completamente non correlato con il qubit sconosciuto $|\psi\rangle$, ma la misurazione nella base di Bell di Alice stabilisce una correlazione tra lo stato sconosciuto e lo stato entangled di Alice. Il risultato della misurazione è infatti completamente casuale, quindi Alice (e Bob) non acquisiscono alcuna informazione su $|\psi\rangle$ facendo questa misurazione. E questa è una buona cosa, poiché sappiamo che se dovessero raccogliere qualsiasi informazione sullo stato, disturberebbero inevitabilmente lo stato. Come fa allora lo stato quantico a viaggiare da Alice a Bob? È un po' sconcertante. Da un lato, non possiamo dire che i due bit classici che sono stati trasmessi abbiano portato questa informazione - i bit erano casuali. Quindi siamo tentati di dire che la coppia entangled condivisa ha reso possibile il teletrasporto. Ma ricordiamo che la coppia entangled è stata preparata molto prima che Alice inviasse il qubit a Bob...". (Preskill)

Teletrasporto quantistico



Bibliografia

Benenti, G., Casati, G., Rossini, D., & Strini, G. (2018). Principles of Quantum Computation and Information: A Comprehensive Textbook. World scientific.

Bennett, C. H., & Wiesner, S. J. (1992). Communication via one-and two-particle operators on Einstein-Podolsky-Rosen states. *Physical review letters*, 69(20), 2881.

Ghirardi, G. C., & Weber, T. (1983). Quantum mechanics and faster-than-light communication: methodological considerations. *Il Nuovo Cimento B (1971-1996)*, 78(1), 9-20.

Ghirardi, G. (2013). Entanglement, nonlocality, superluminal signaling and cloning. *arXiv preprint arXiv:1305.2305*.

Ghirardi, G. C. (2009). Un'occhiata alle carte di Dio. Gli interrogativi che la scienza moderna pone all'uomo (Vol. 70). Il saggiatore.

Herbert, N. (1982). FLASH—A superluminal communicator based upon a new kind of quantum measurement. *Foundations of Physics*, 12(12), 1171-1179.

Mattle, K., Weinfurter, H., Kwiat, P. G., & Zeilinger, A. (1996). Dense coding in experimental quantum communication. *Physical Review Letters*, 76(25), 4656.

Nielsen, M. A., & Chuang, I. (2002). Quantum computation and quantum information.

J. Preskill, lecture notes at <http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/ph229>

Satanassi, S. (2019). Quantum Computers for High School: Design of Activities for an I SEE Teaching Module. (Master's thesis). Alma Mater Studiorum – University of Bologna, Italy. Retrieved from: <https://amslaurea.unibo.it/id/eprint/18157>

Ursin, R., Jennewein, T., Aspelmeyer, M., Kaltenbaek, R., Lindenthal, M., Walther, P., & Zeilinger, A. (2004). Quantum teleportation across the Danube. *Nature*, 430(7002), 849-849.

Wootters, W. K., & Zurek, W. H. (1982). A single quantum cannot be cloned. *Nature*, 299(5886), 802-803.