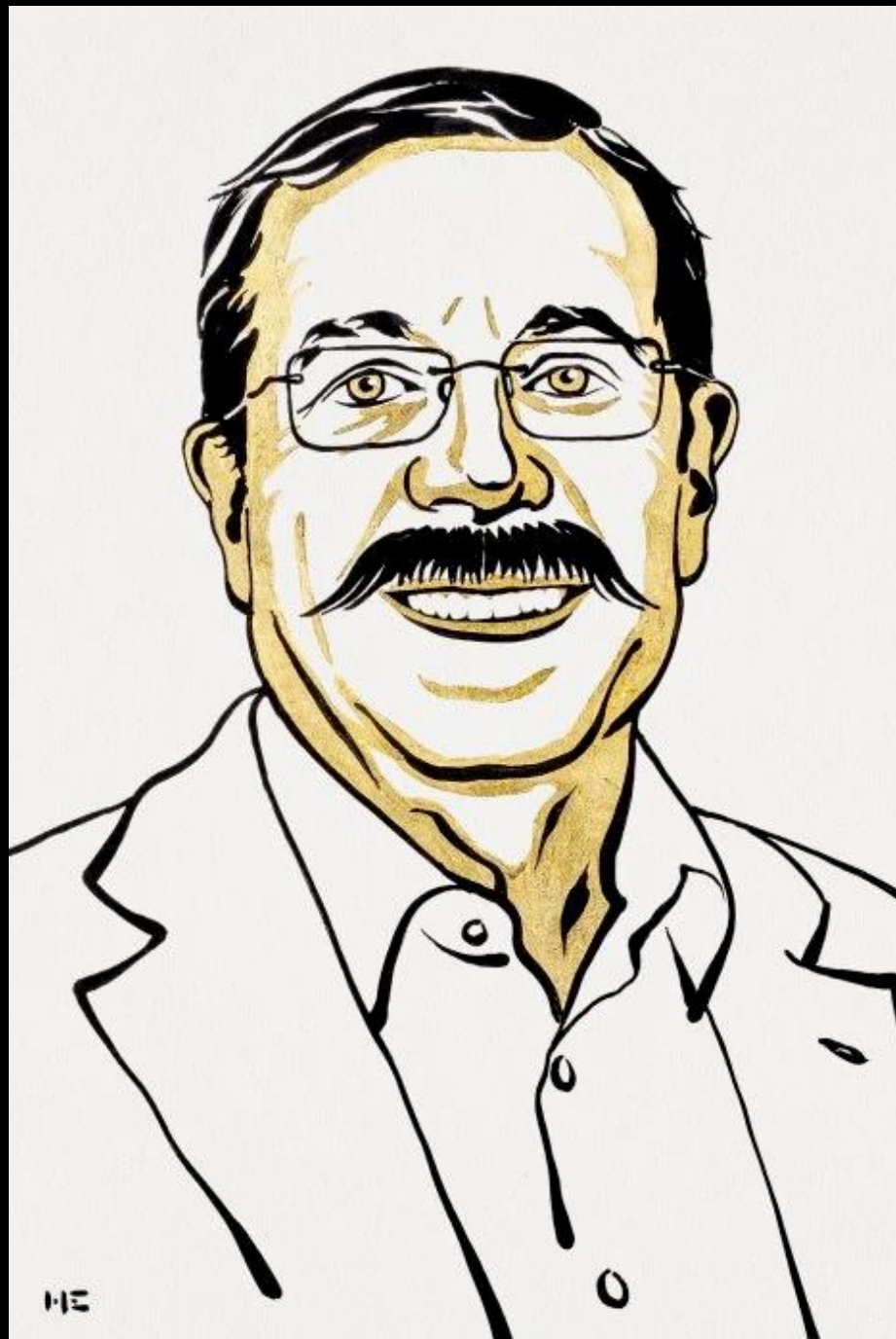




«Per gli esperimenti con i fotoni entangled che hanno stabilito la violazione delle disuguaglianze di Bell e per essere stati i pionieri della scienza dell'informazione quantistica»

ALAIN ASPECT



Fisico francese, nato nel 1947 ad Agen, Francia. PhD nel 1983 presso l'Università Paris-Sud, Orsay. È professore presso l'Institut d'Optique Graduate School – Université Paris-Saclay e École Polytechnique, e Directeur de Recherche CNRS presso il Laboratoire Charles Fabry.

La sua ricerca scientifica comprende

- i test sulle disuguaglianze di Bell con fotoni entangled (PhD, 1974-1983),
- lo studio sul dualismo onda-particella per singoli fotoni (1984-1986 con Grangier),
- Il raffreddamento di atomi con i laser (1985-1992, con Coen-Tannoudji),
- gli atomi ultra-freddi, i gas quantistici e i simulatori quantistici (1992 - oggi) nel gruppo di Ottica atomica da lui fondato all'Institut d'Optique.

JOHN F. CLAUSER

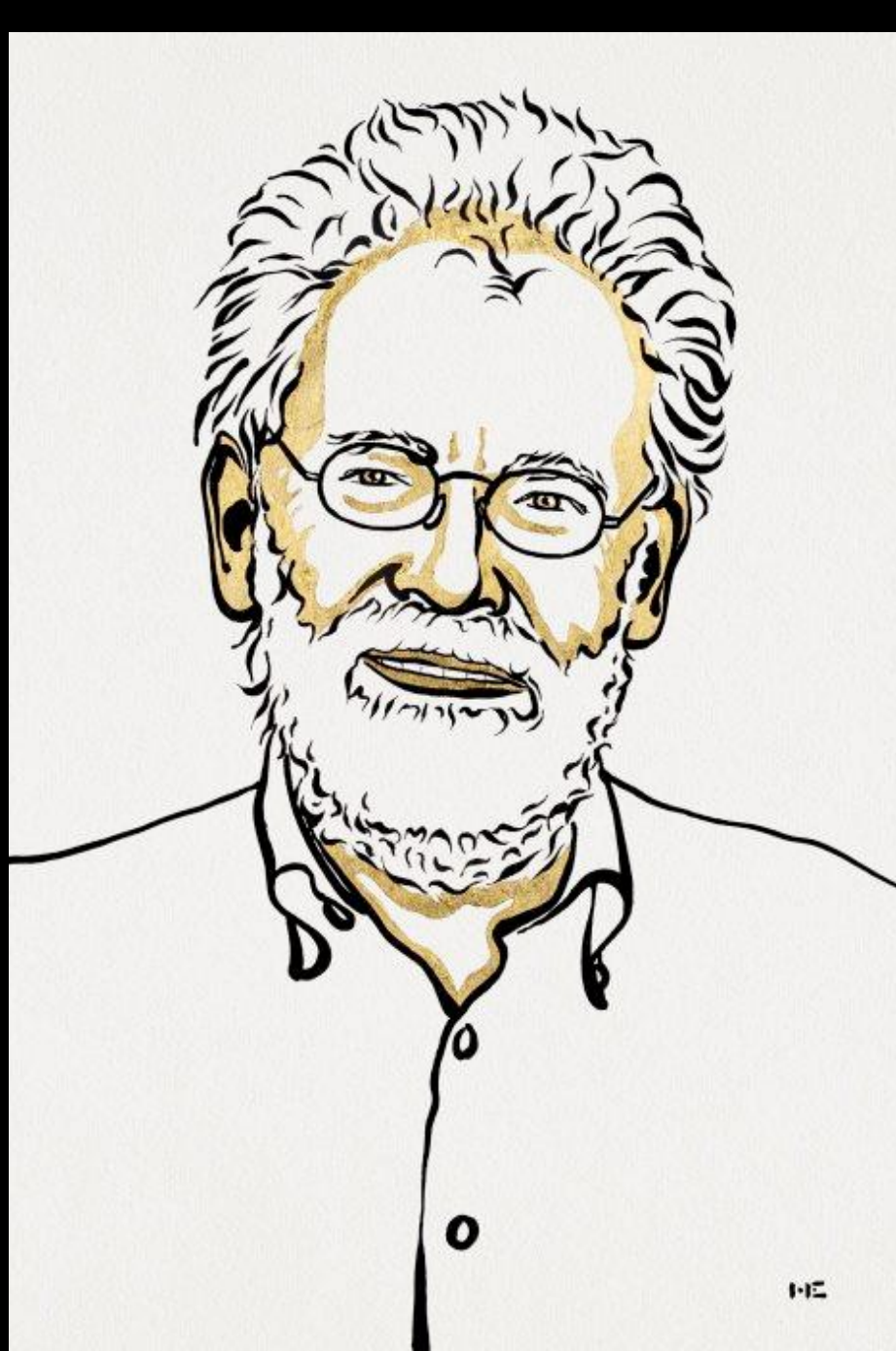
Fisico americano, nato nel 1942 a Pasadena, CA, USA, PhD nel 1969 presso la Columbia University, New York, USA. Attualmente svolge la sua attività di ricerca presso il JF Clauser & Assoc., Walnut Creek, CA, USA.

Ha svolto attività sia in ambito teorico che sperimentale, è noto

- per i suoi contributi alla Meccanica Quantistica, in particolare per la disuguaglianza di Clauser-Horne-Shimony-Holt (CHSH),
- per la prima prova sperimentale che l'entanglement non-locale è reale (Freedman-Clauser), per la formulazione della teoria non-locale (Clauser-Horne).



ANTON ZEILINGER



Fisico austriaco, nato nel 1945 a Ried im Innkreis, Austria. PhD nel 1971 presso l'Università di Vienna, è professore emerito di fisica all'Università di Vienna, e Senior Scientist presso l'Accademia austriaca delle scienze.

La sua attività di ricerca include

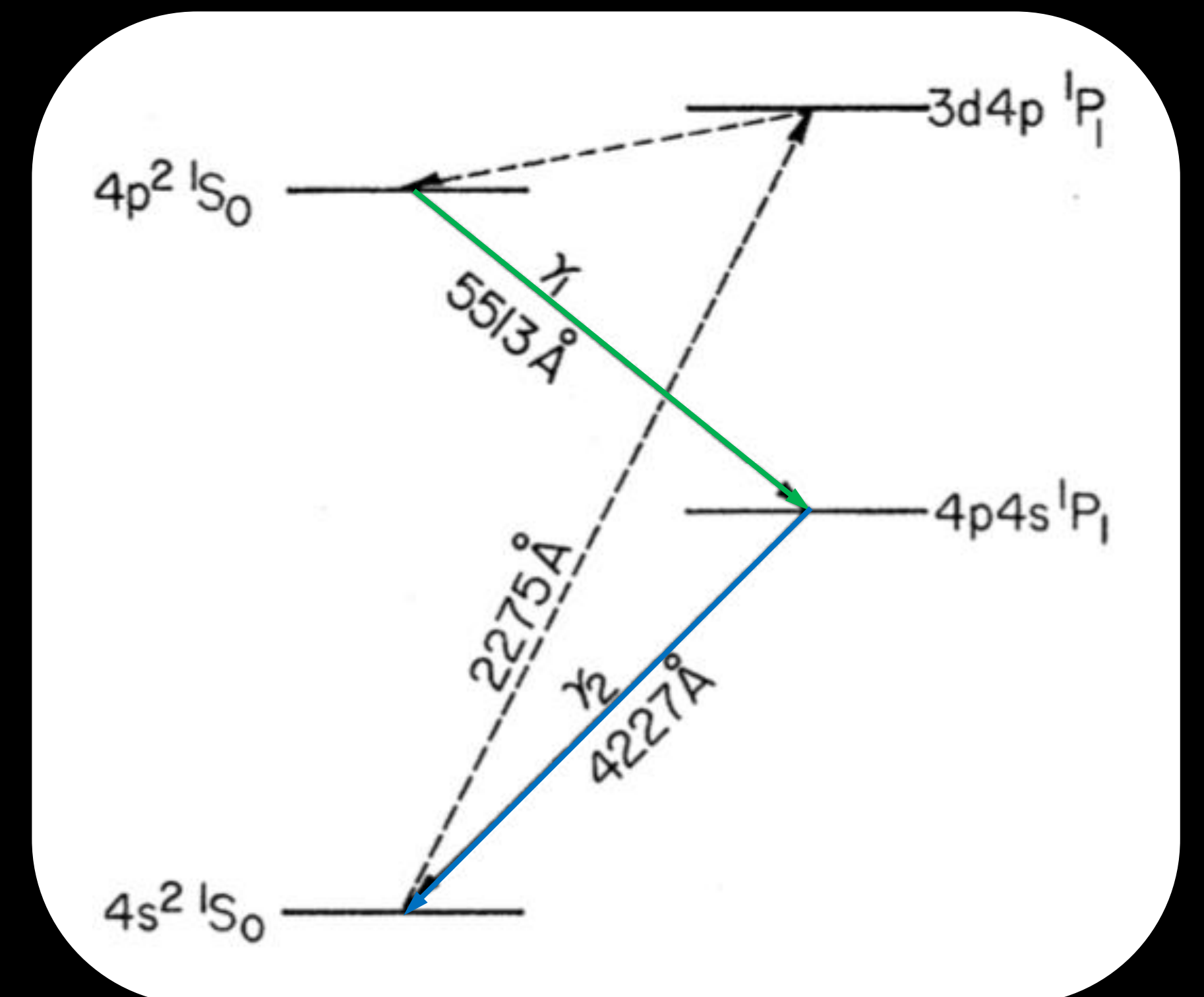
- studi sui fondamenti della fisica quantistica e sulle sue applicazioni nell'ambito dell'informazione quantistica,
- la realizzazione sperimentale dei cosiddetti "Stati GHZ", i primi stati entangled multipartiti scoperti (con Greenberger e Horne),
- esperimenti di teletrasporto quantistico con fotoni entangled, crittografia e comunicazione quantistica.

ESPERIMENTI DA NOBEL
Apparati sperimentali

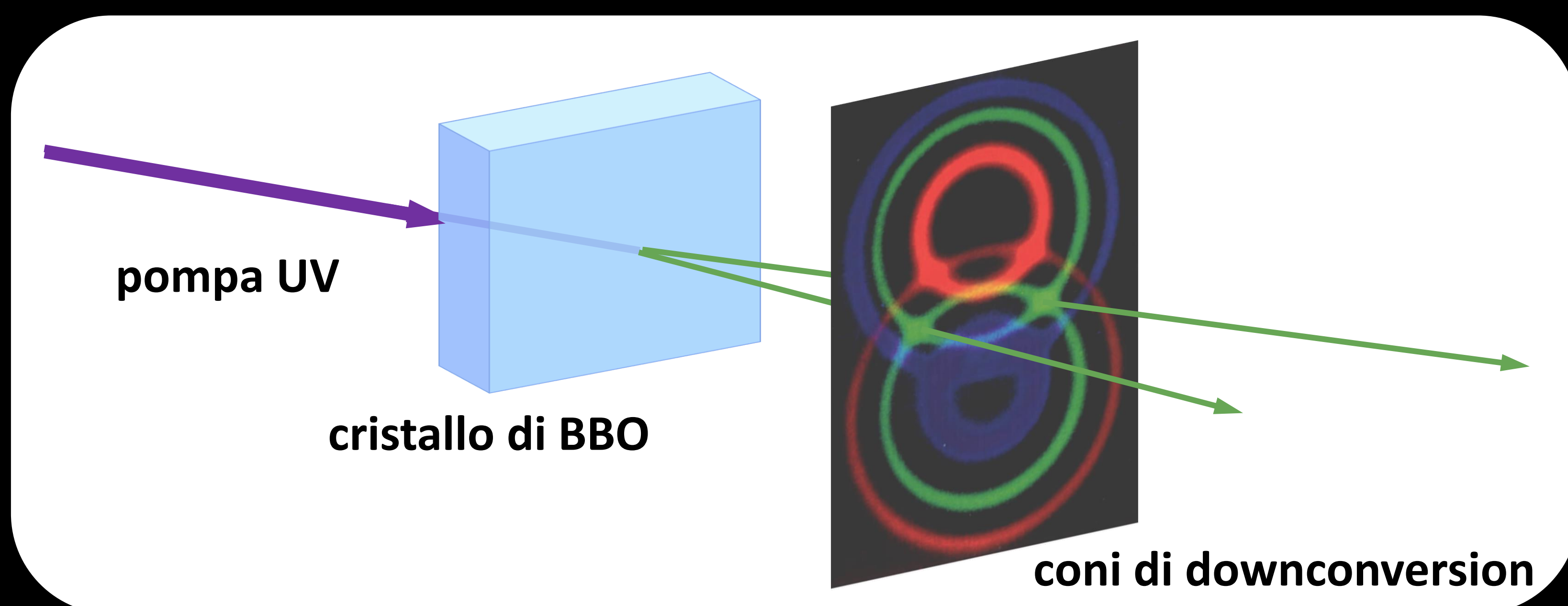
LA SORGENTE

Clauser e Aspect usarono una sorgente di atomi di ^{40}Ca , per la produzione di una **coppia di fotoni entangled in cascata** alle lunghezze d'onda di 551.3 nm e 422.7 nm.

Zeilinger sostituì il sistema atomico con un sistema ottico basato sul processo nonlineare della **parametric down conversion**, in cui un laser, interagendo all'interno di un cristallo nonlineare con lo **stato di vuoto**, genera coppie di fotoni entangled in polarizzazione



Adattato da *Phys. Rev. Lett.* **28**, 938-941 (1972)



Adattato da *Rev. Mod. Phys.* **71**, S288-S297 (1999)

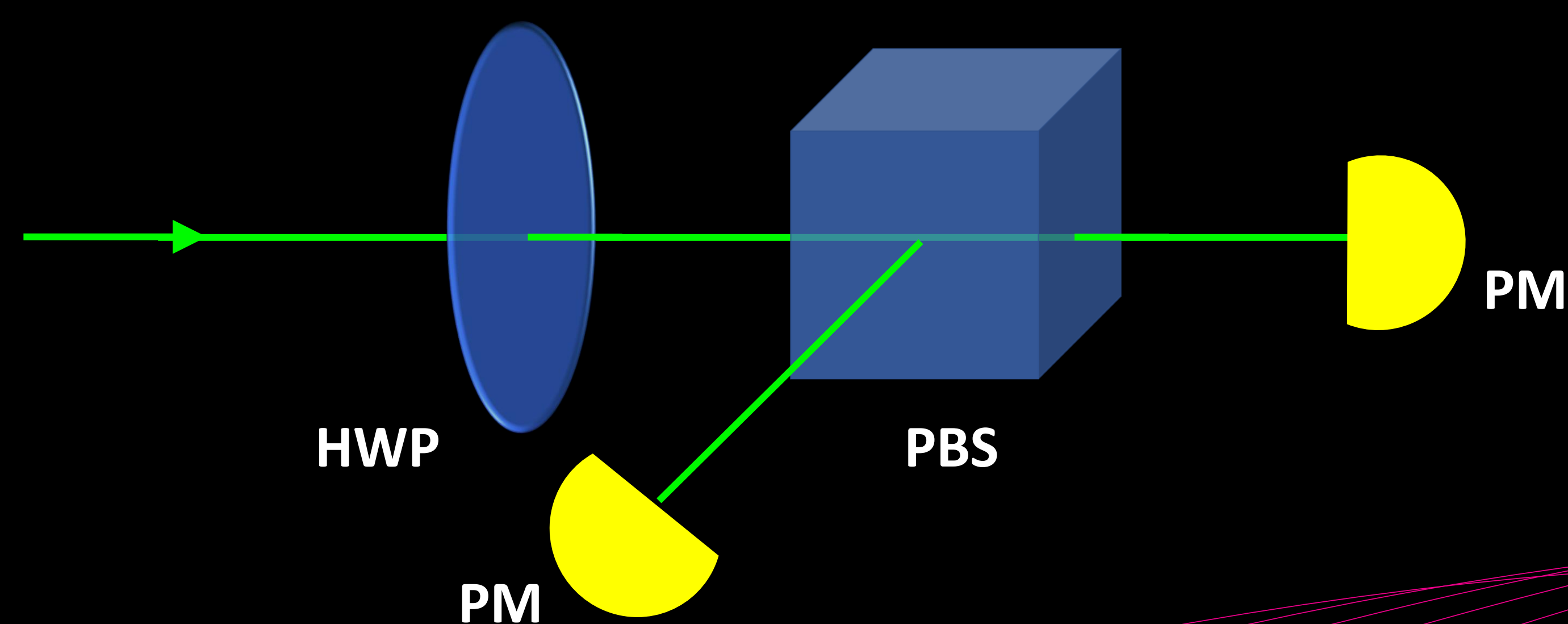
$$|\phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|H\rangle_1 |H\rangle_2 + |V\rangle_1 |V\rangle_2)$$

dove H e V sono la polarizzazione verticale e orizzontale della luce prodotta.

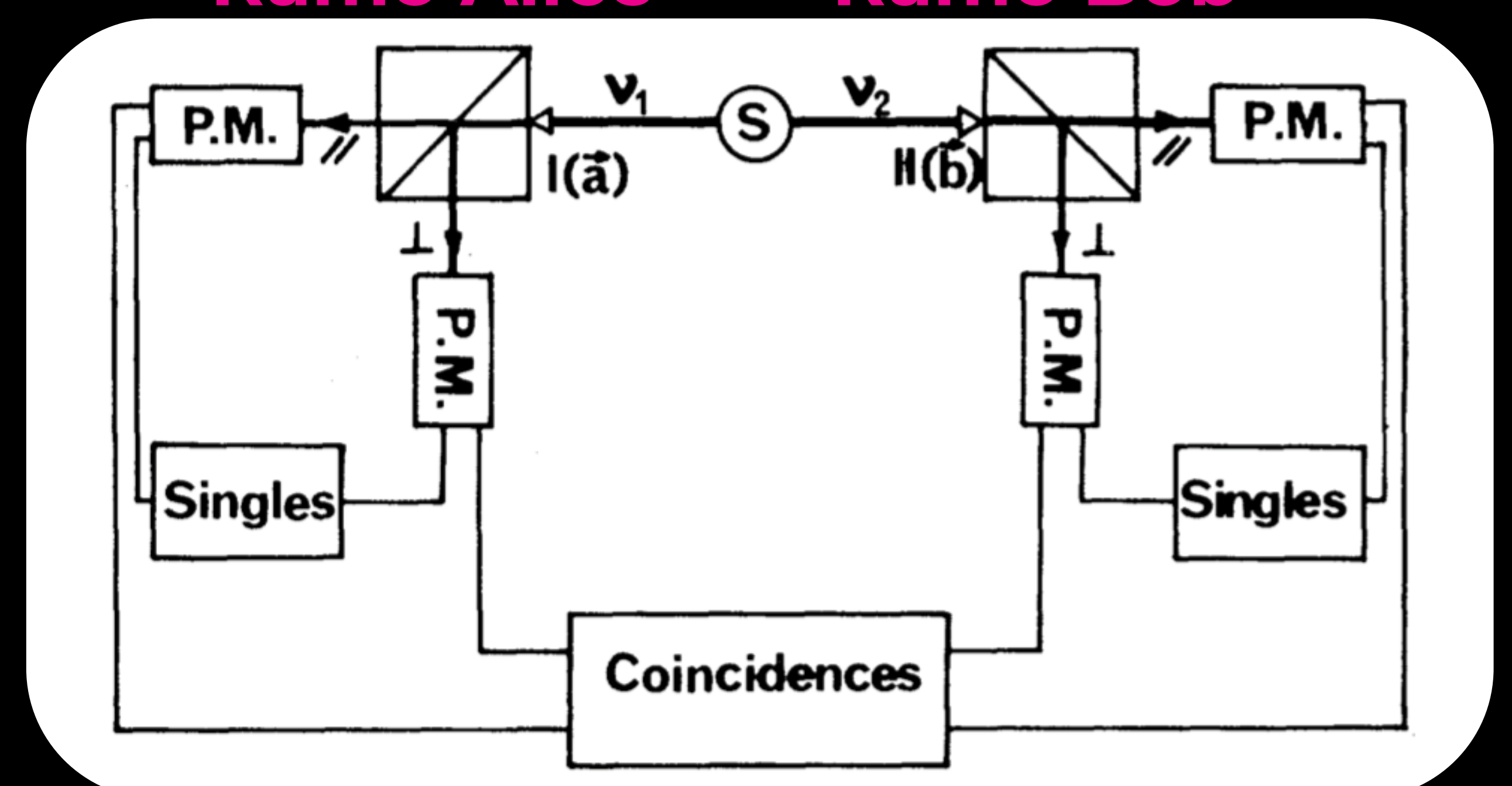
L'APPARATO DI MISURA

I test di violazione delle disuguaglianze di Bell consistono nell'eseguire **misure di polarizzazione** dei fotoni in due o più basi orientate ad angoli diversi (ad esempio orizzontale e verticale o diagonale e anti-diagonale). Le due proprietà misurate sono incompatibili fra loro.

L'apparato di Aspect (1982) era costituito da una lamina $\lambda/2$ (HWP) per ruotare la polarizzazione e da un beam splitter cubico polarizzatore (PBS) per separare le due polarizzazioni. La luce era misurata da due fotomoltiplicatori (PM).



Ramo Alice Ramo Bob



Adattato da *Phys. Rev. Lett.* **49**, 91-94 (1982)

Alice e Bob misurano un fotone alla volta. In ciascun ramo solo uno dei due PM deve fare **click**. Alice e Bob memorizzano il numero di fotoni misurati (singles) e il numero di **coincidenze** fra le loro misure.

Quando scelgono la **stessa base**, Alice e Bob ottengono **correlazioni perfette**, altrimenti i risultati sono indipendenti e le correlazioni osservate sono casuali.

ESPERIMENTI DA NOBEL

Violazione delle disuguaglianze di Bell

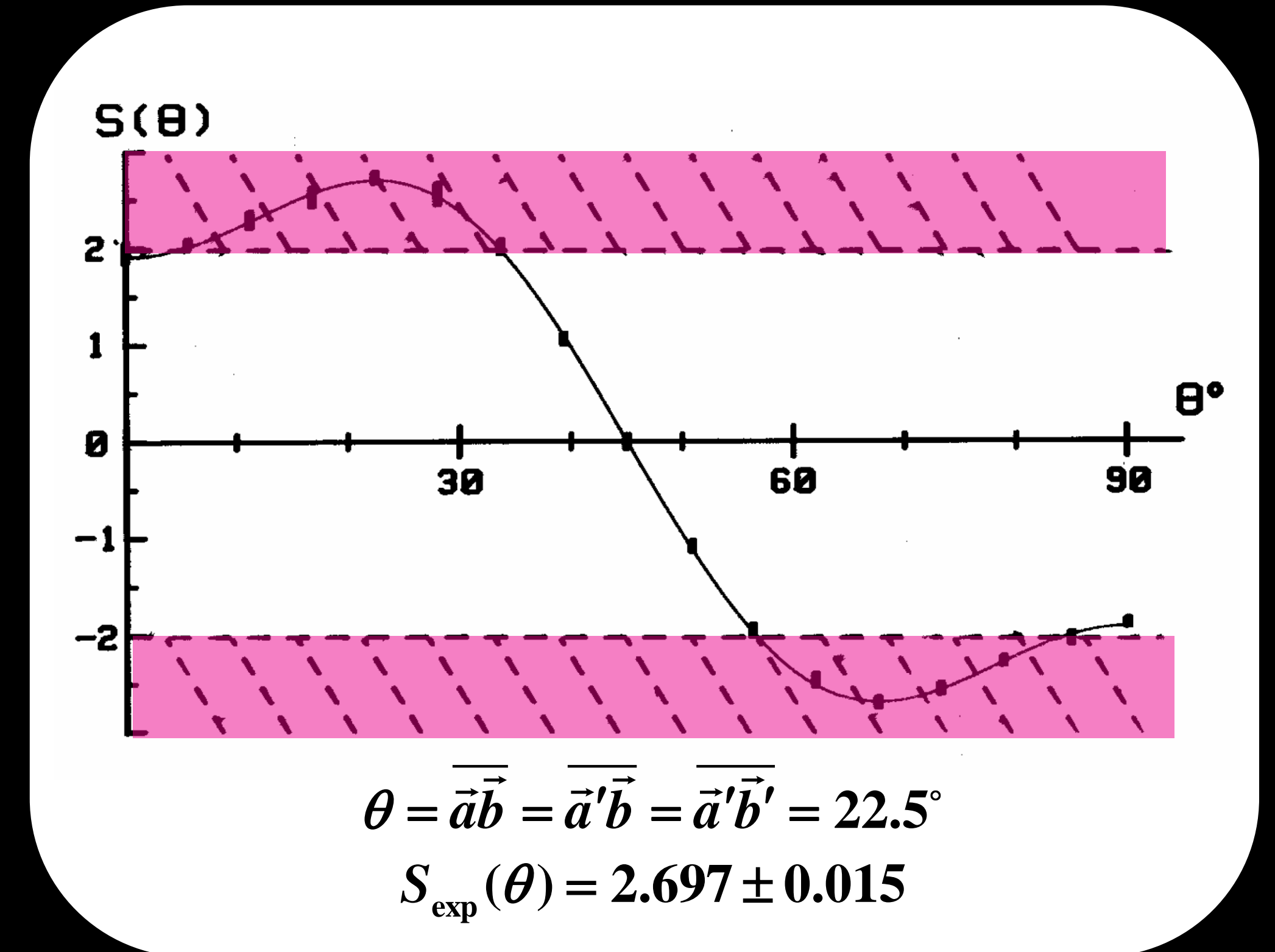
Per dimostrare la violazione delle disuguaglianze di Bell nella forma CHSH bisogna misurare le **coincidenze** R al variare dell'angolo relativo dei polarizzatori sui due rami di un esperimento tipo EPR. Per ogni coppia di scelte degli angoli (\vec{a}, \vec{b}) , (\vec{a}, \vec{b}') , (\vec{a}', \vec{b}) , (\vec{a}', \vec{b}') si calcola

$$E = \frac{R_{++} + R_{--} - R_{+-} - R_{-+}}{R_{++} + R_{--} + R_{+-} + R_{-+}}$$

$$S = E(\vec{a}, \vec{b}) - E(\vec{a}, \vec{b}') + E(\vec{a}', \vec{b}) + E(\vec{a}', \vec{b}')$$

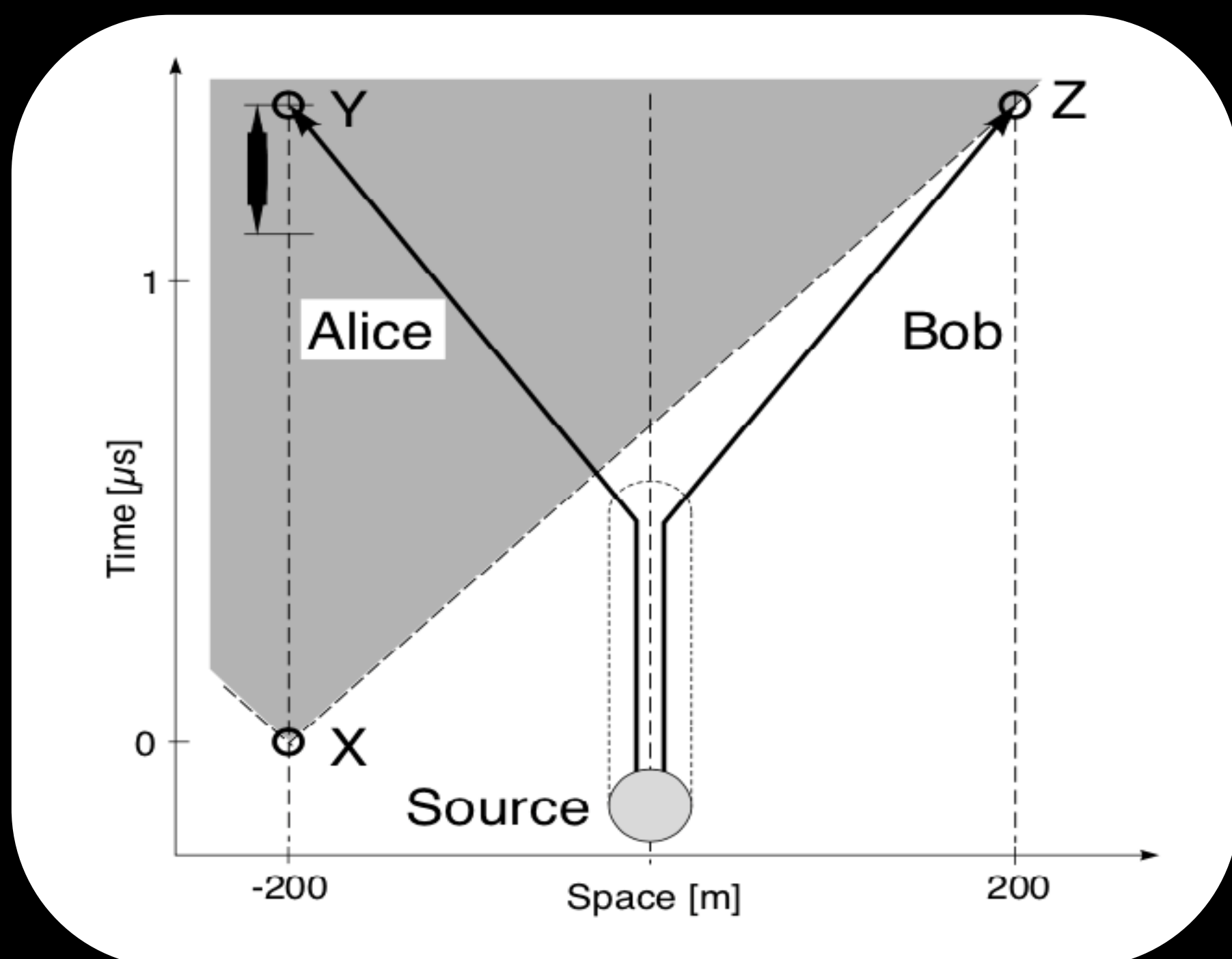
Sotto le ipotesi di **realismo** e **località** $-2 \leq S \leq 2$

La meccanica quantistica predice che la disuguaglianza può essere violata!



Adattato da: quant-ph/papers/0402/0402001.pdf
 dove θ è l'angolo compreso fra le direzioni di misura

L'esperimento dimostra che per certi angoli la disuguaglianza di Bell è violata e vale $S = \pm 2\sqrt{2}$



Adattato da Phys. Rev. Lett. **81**, 5039-5043 (1998)

L'INDIPENDENZA DELLE MISURE

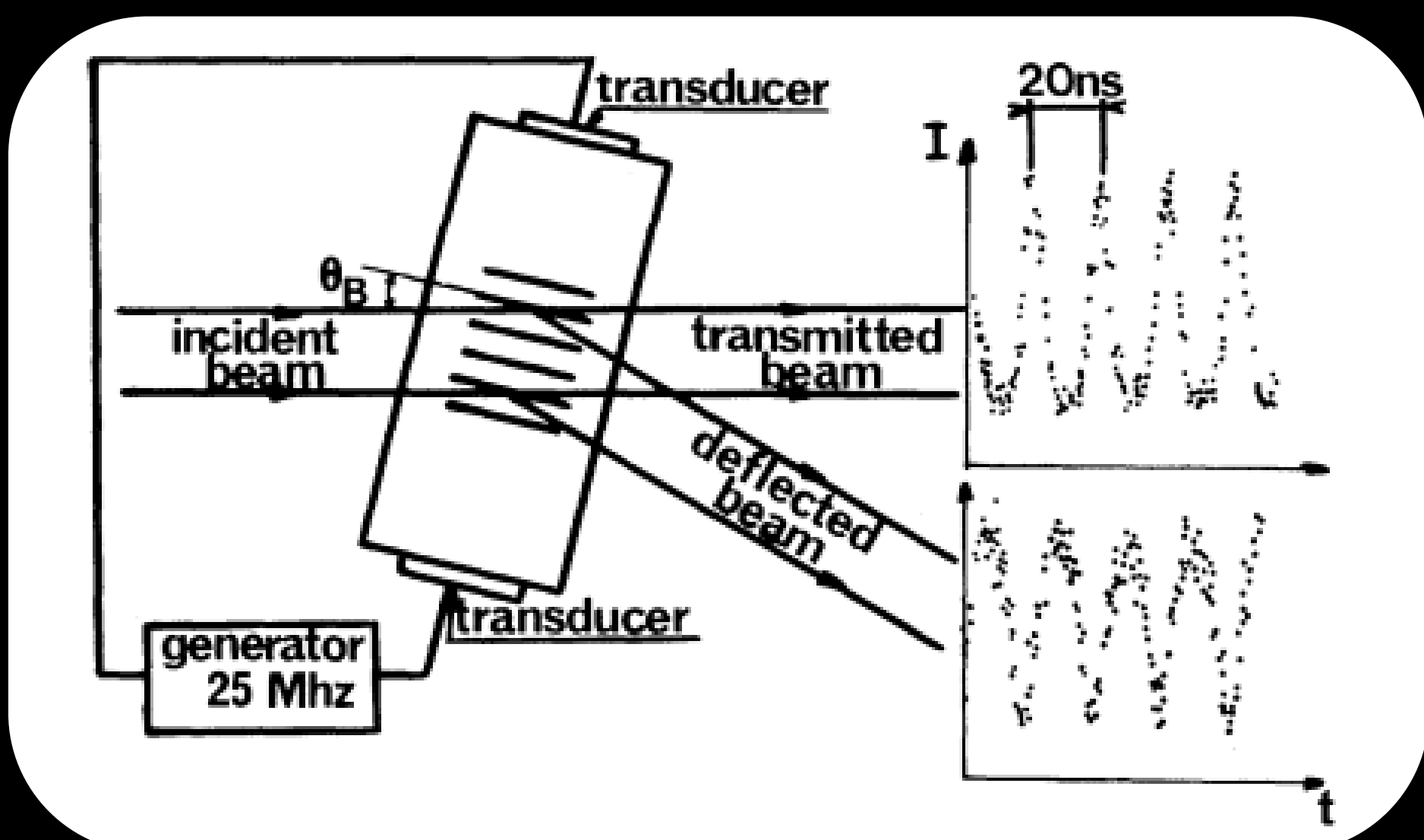
Le misure sui due rami devono essere **locali**.

Gli apparati di misura non devono comunicare.

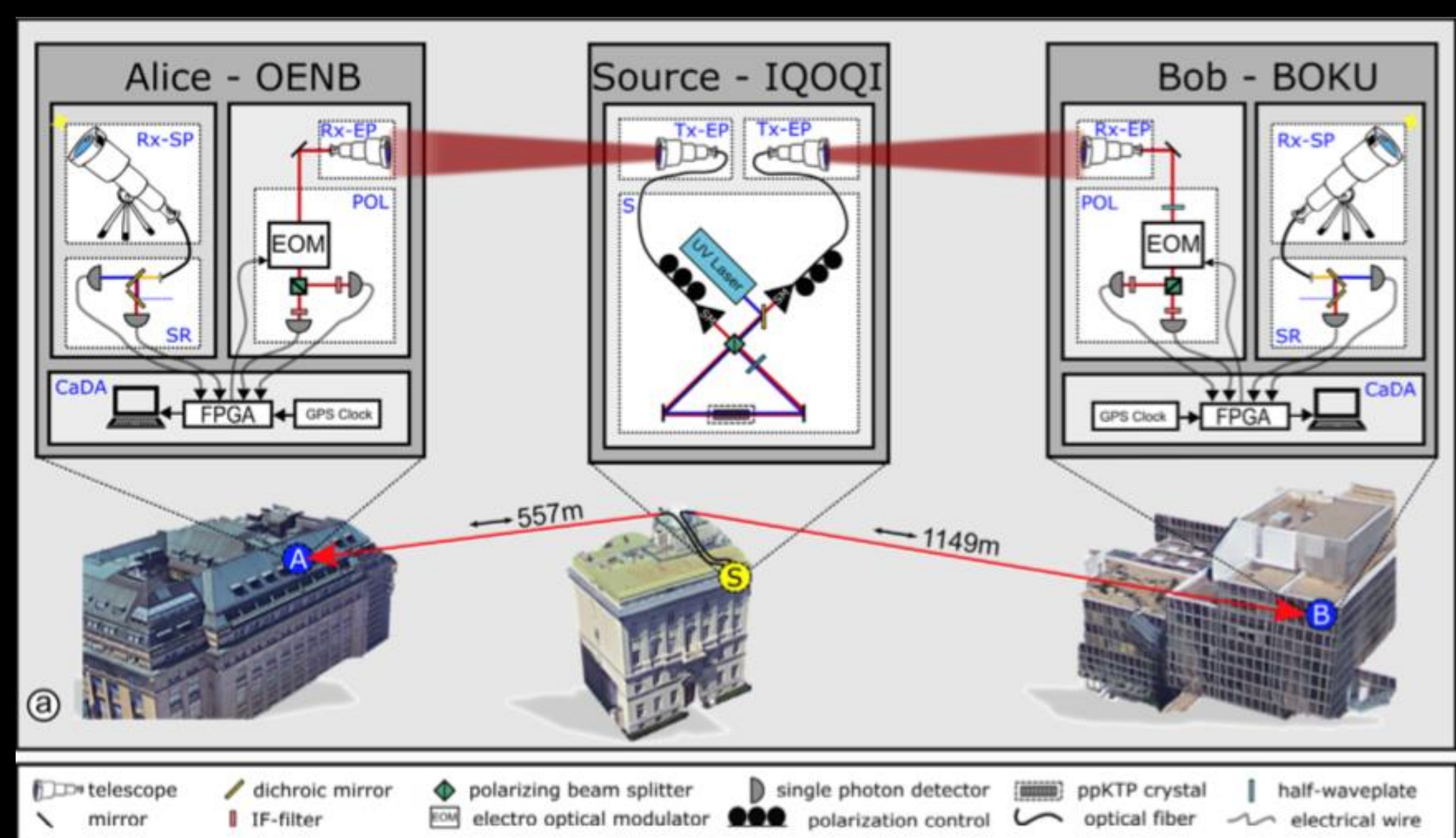
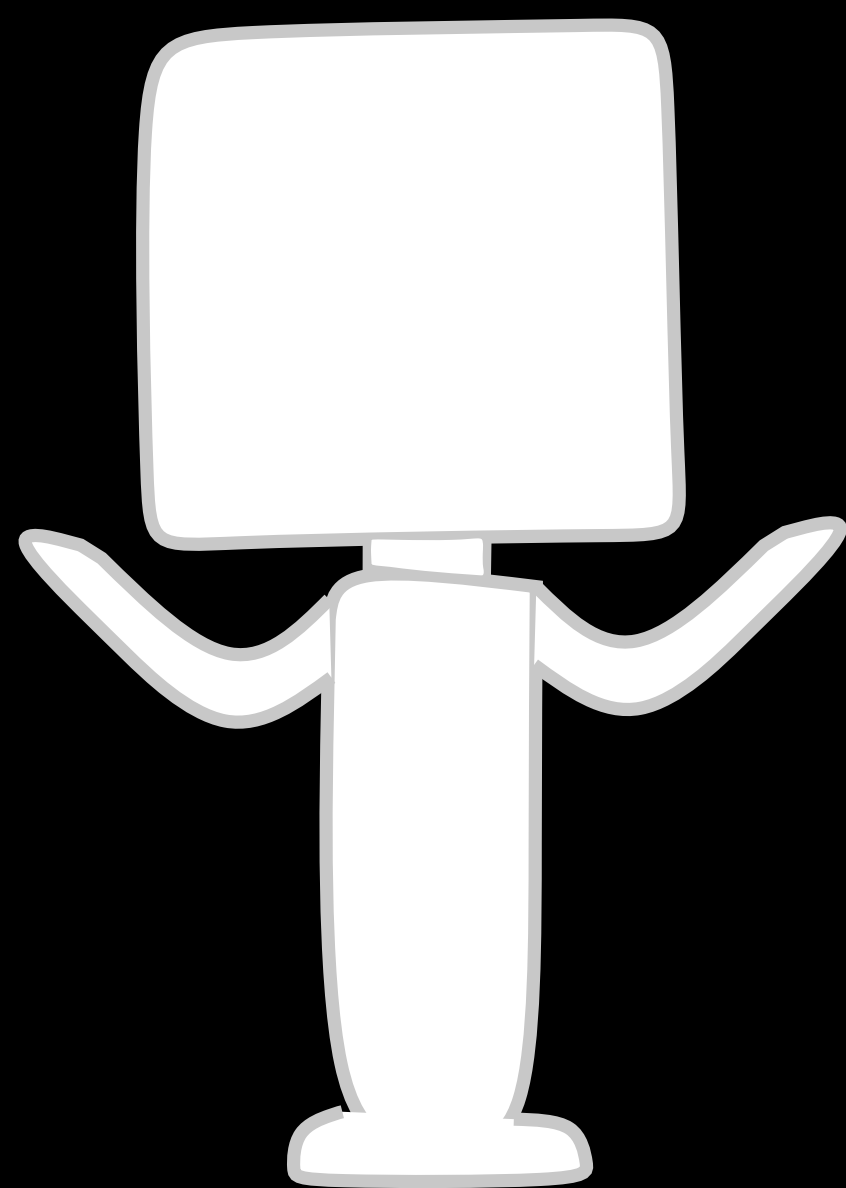
Le scelte dell'orientazione dei polarizzatori devono essere casuali.

Sono stati costruiti apparati sperimentali su grandi distanze (anche decine di metri) e si sono adottati sistemi opto-elettronici sui due rami per la scelta indipendente delle basi di polarizzazione in cui effettuare le misure.

Aspect usò un modulatore acusto-ottico e Zeilinger diverse tipologie di generatori di numeri random. Nel 2017 utilizzò la luce proveniente da due stelle lontane.



Adattato da Phys. Rev. Lett. **49**, 1804-1807 (1982)



Adattato da Phys. Rev. Lett. **118**, 060401 (2017)