

Il paradosso del “which way?”:
onda o particella ?
Lo decido io!

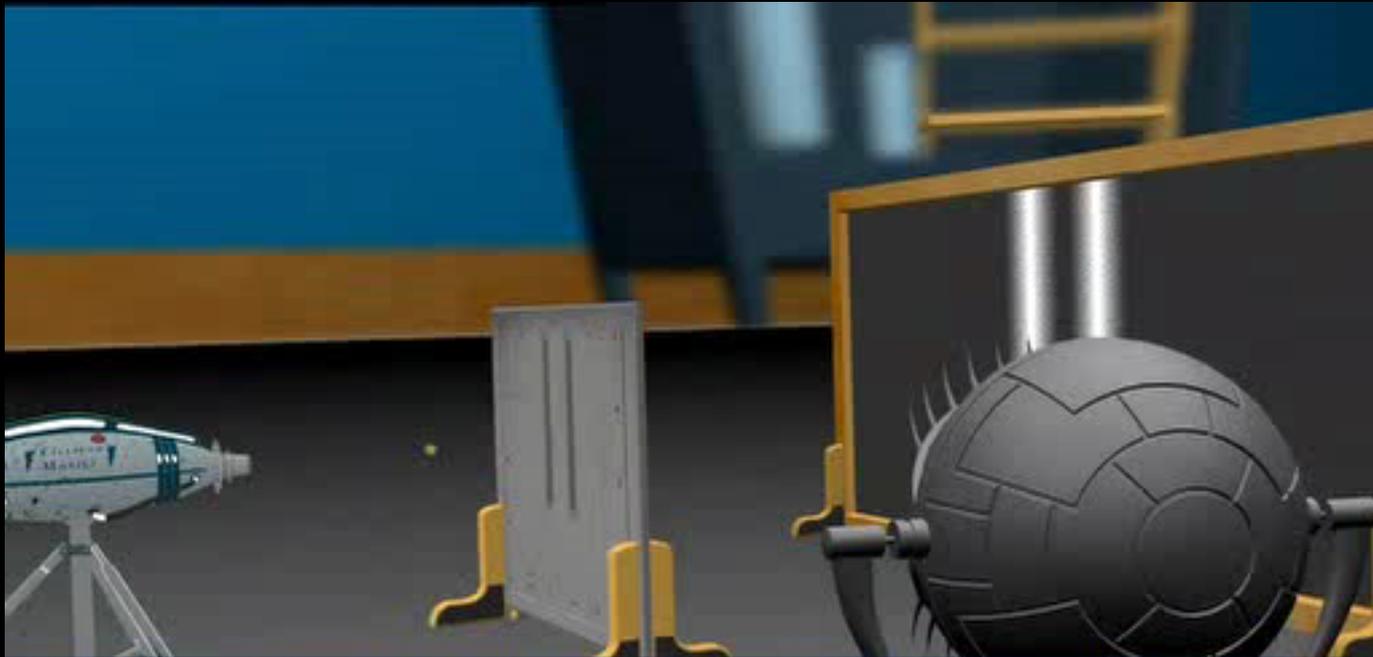
Giorgio Lulli

Un passo avanti rispetto al “dualismo” onda-particella

Il problema è:

cosa accade se nell' esperimento più bello cerchiamo di sapere da che parte (*which way?*) è passato l'elettrone?

Il Dr. Quantum ci ha detto, in modo alquanto sibillino, che conoscere da che parte passa l' elettrone fa scomparire il fenomeno dell' interferenza (precisamente che *“l' osservatore ha fatto collassare la funzione d' onda”*)!



tutte queste possibilità si trovano in sovrapposizione l'una con l'altra

Abbiamo visto che anche la luce si può comportare come onda o corpuscolo (**fotone**) in modo del tutto simile agli elettroni.

Anche con i *fotoni* si può fare l' esperimento “*which way?*”

Perchè farlo con i fotoni?

- si possono superare alcune difficoltà del sistema a doppia fenditura (reale o virtuale - biprisma)
- L' apparato sperimentale necessario è più semplice e ... economico !
- è più facile ricavare l'informazione sul percorso del fotone **senza esercitare alcun disturbo apprezzabile su esso.**

Elementi tipici di un interferometro ottico di tipo Mach-Zehnder



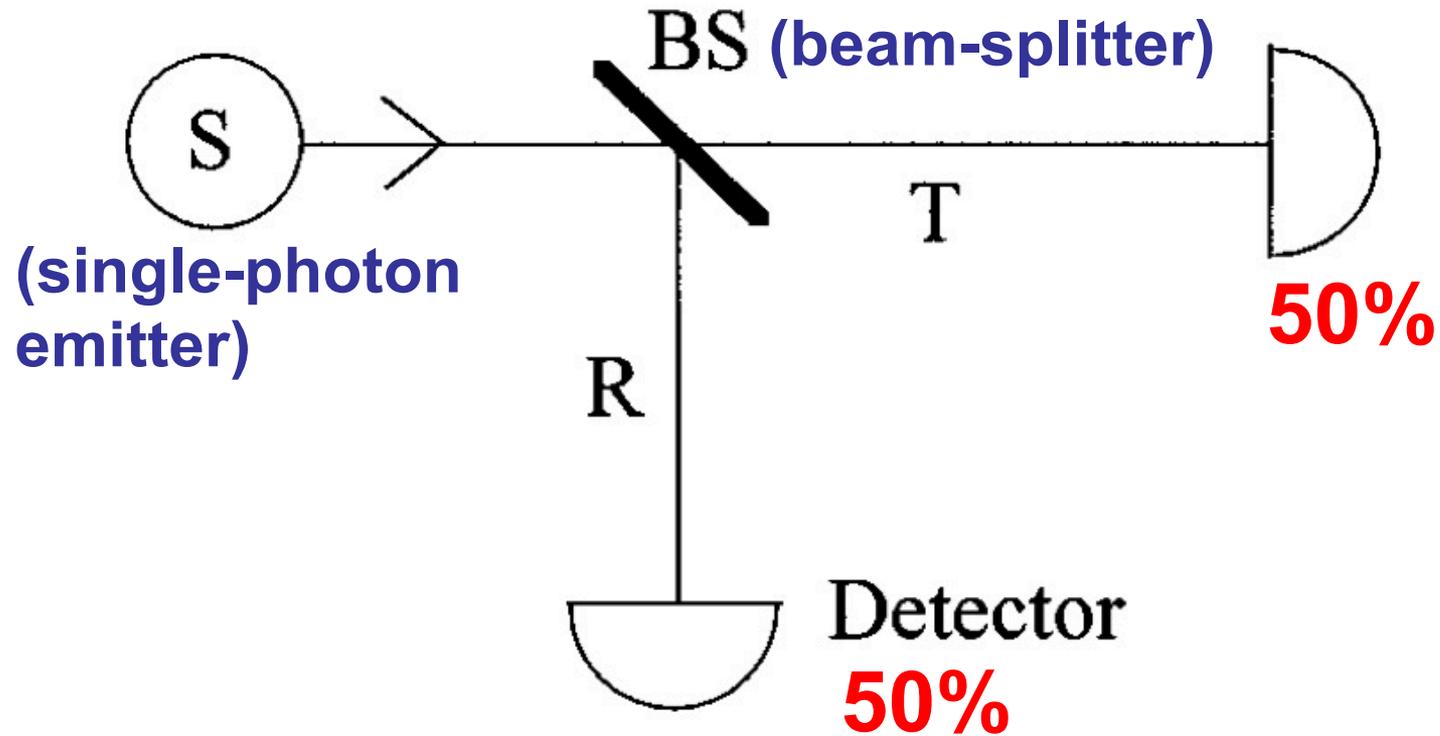
- emettitori e rivelatori di fotoni singoli
- specchi riflettenti e semi-riflettenti
- rivelatori non perturbativi

Avvertenza

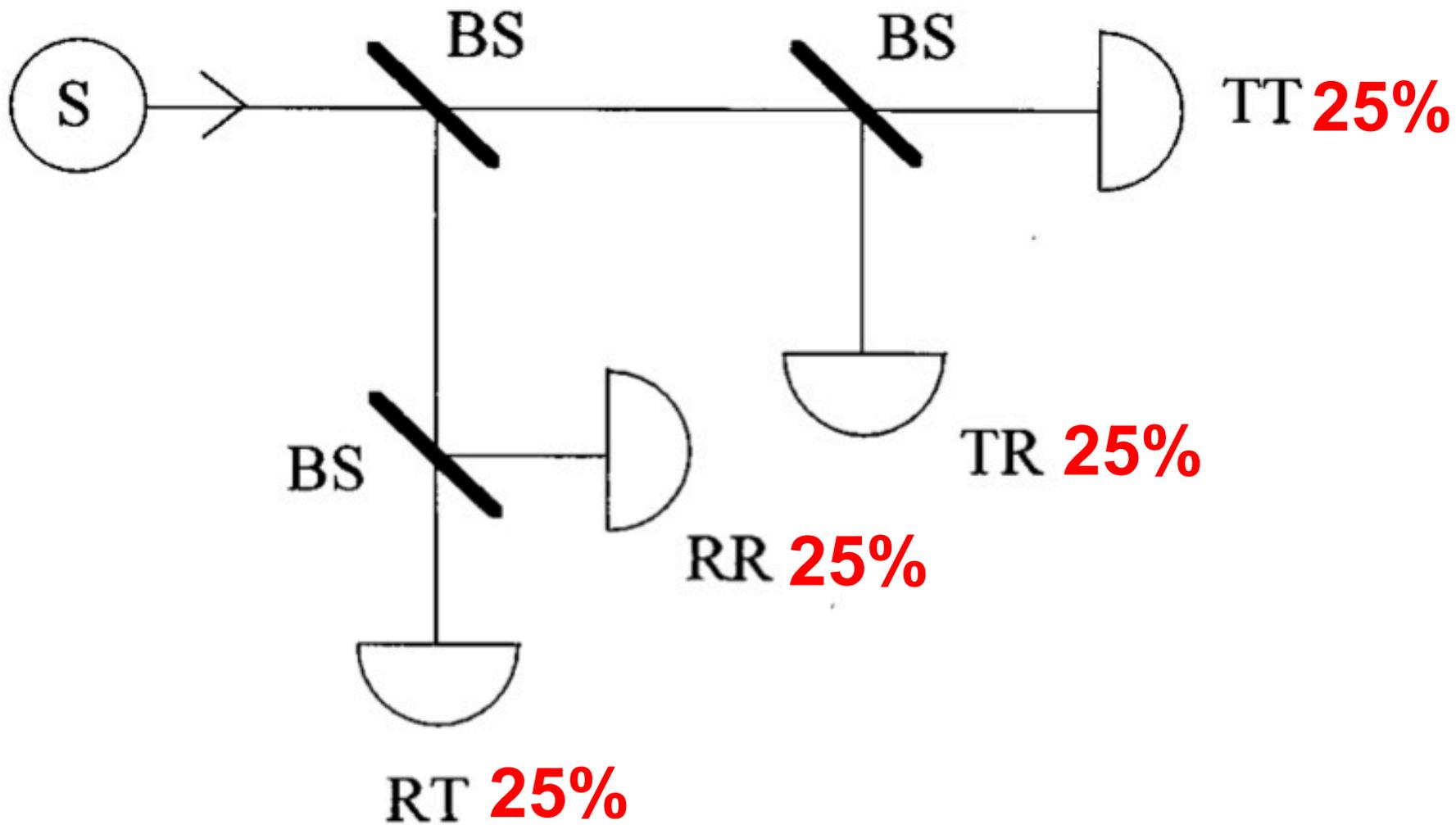
I componenti con le proprietà adatte a realizzare esperimenti quantistici “*which way?*” con singolo fotone sono stati disponibili solo a partire dalla fine degli anni '90.

Benchè semplici concettualmente, gli esperimenti che esamineremo sono di complessa realizzazione, noi ne mostreremo solo degli schemi concettuali semplificati, non preoccupandoci delle problematiche della realizzazione pratica e concentrandoci sui risultati.

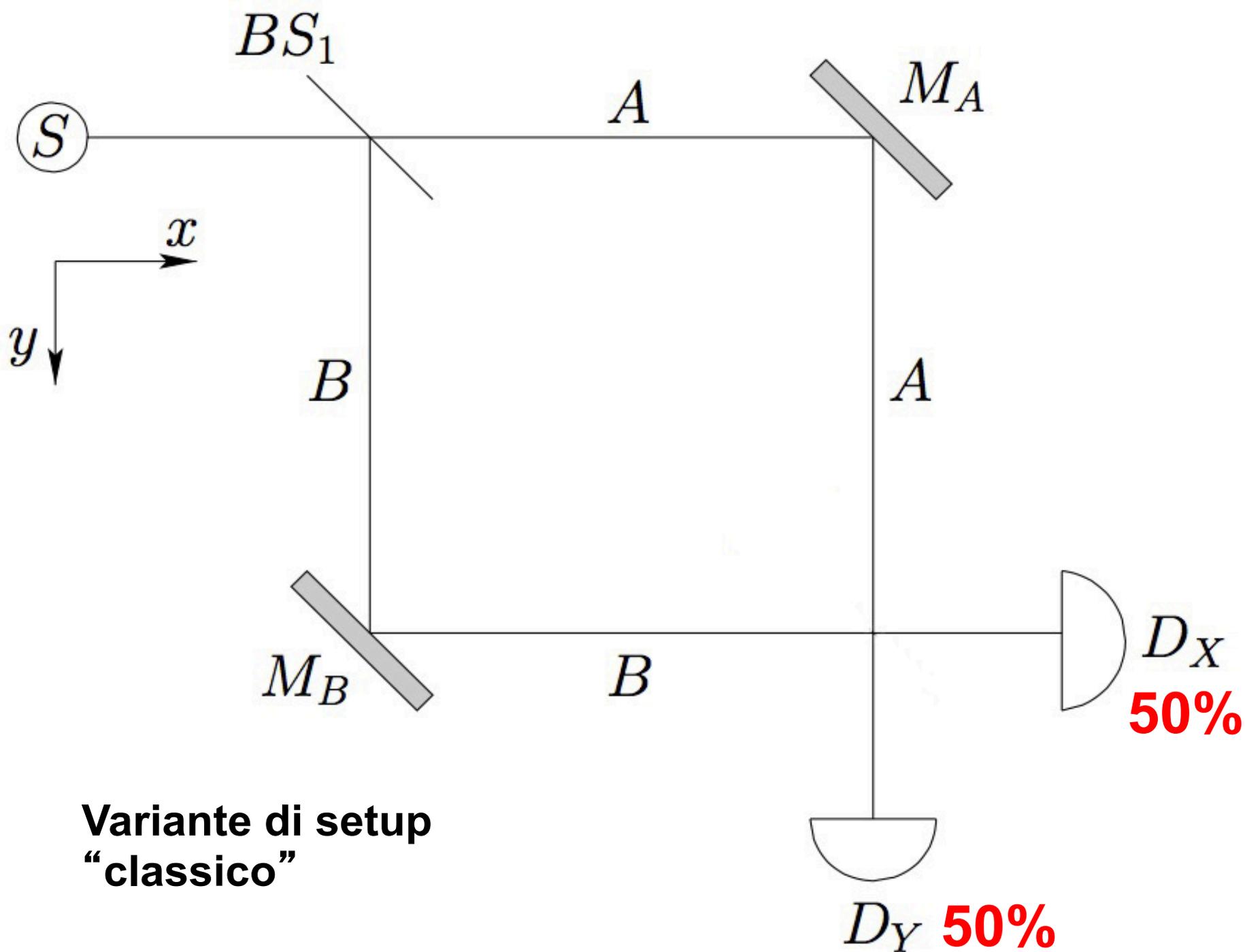
proprietà di uno specchio semiriflettente (beam splitter)

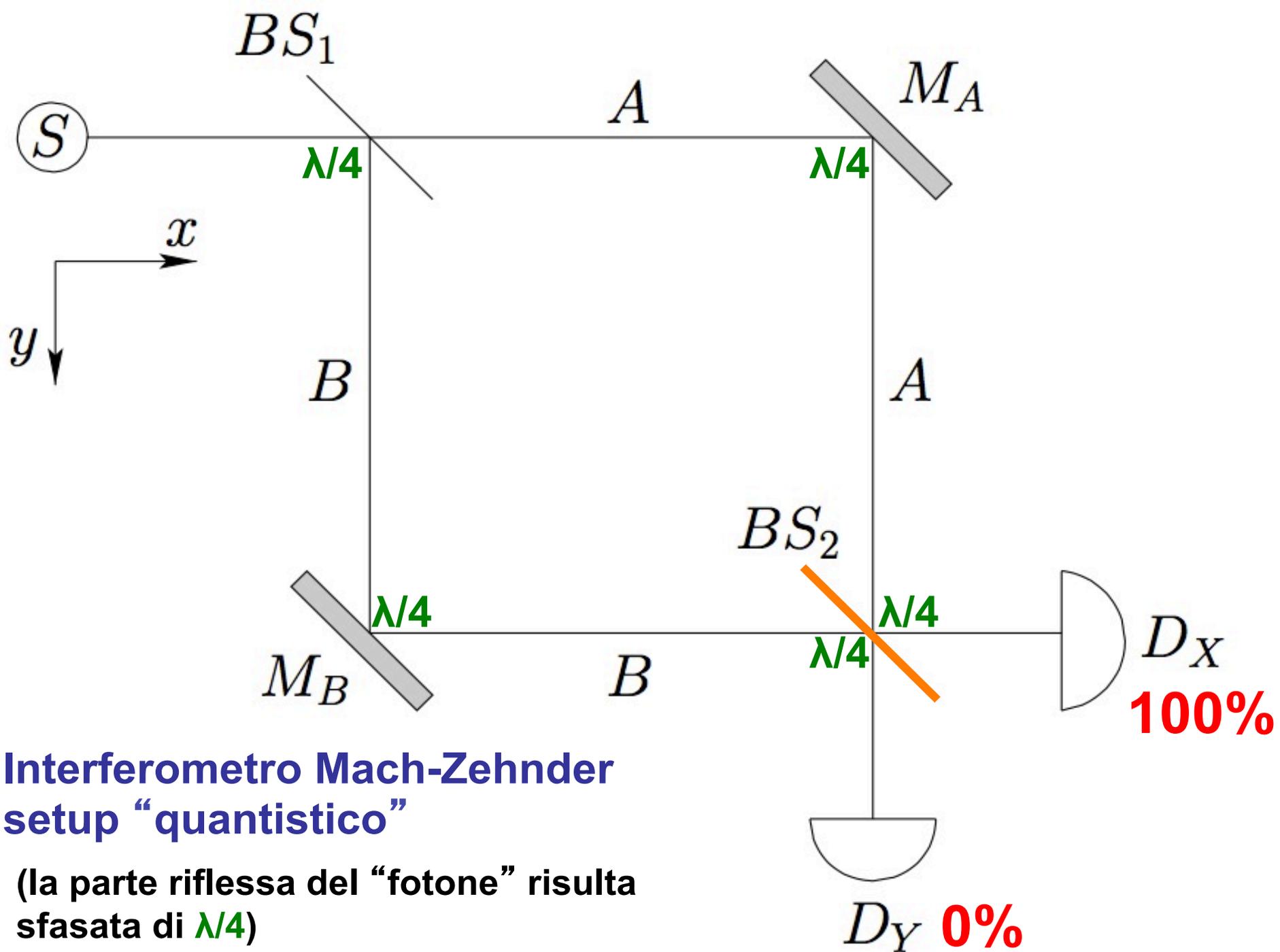


- ogni singolo fotone viene rivelato in *un solo* rivelatore
- la probabilità di arrivo nei 2 rivelatori è del 50%



setup "classico": risultato facilmente prevedibile





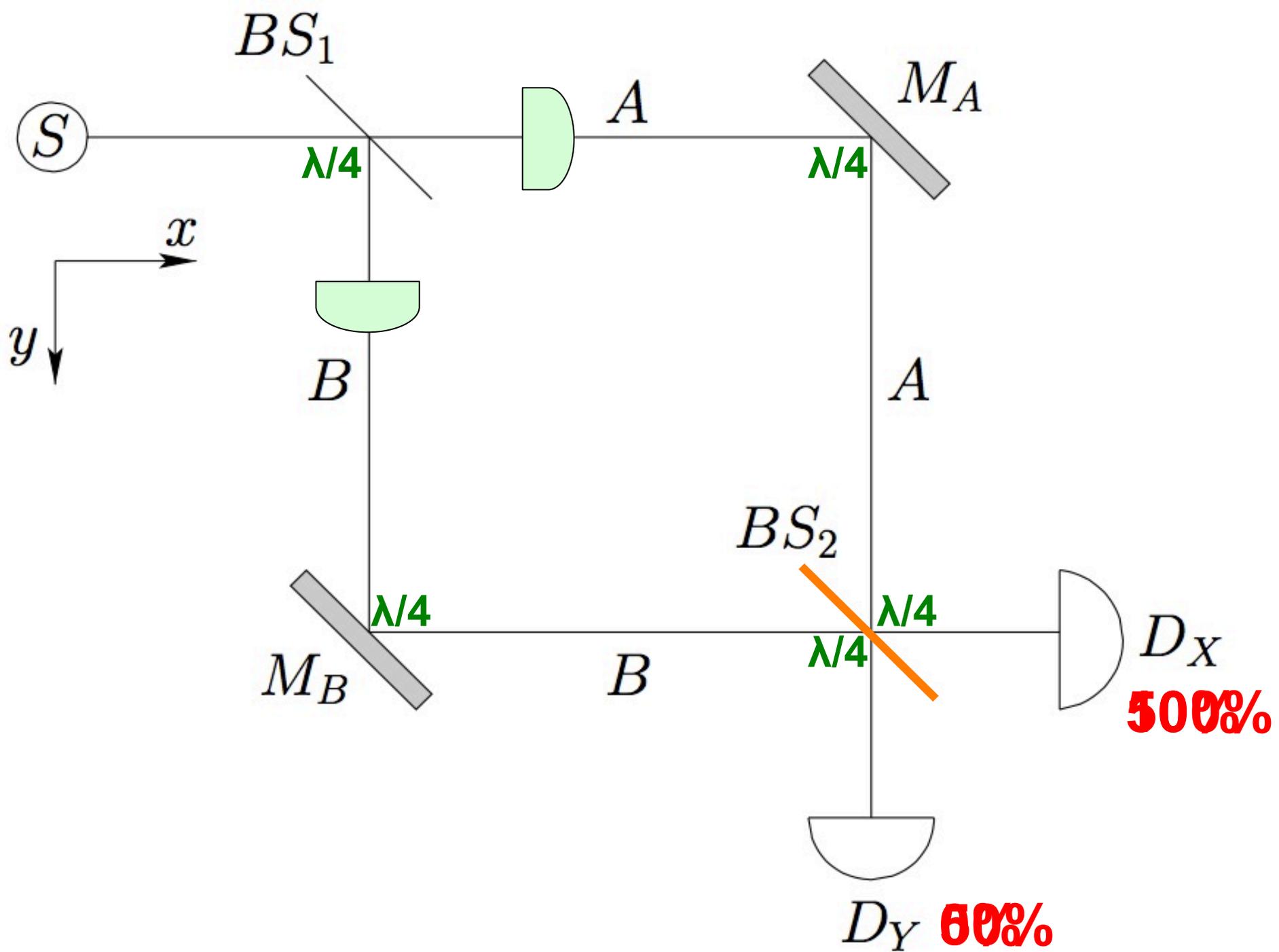
Interferometro Mach-Zehnder setup “quantistico”

(la parte riflessa del “fotone” risulta
sfasata di $\lambda/4$)

Cosa è cambiato con l'inserimento di BS_2 ? Che un fotone ha ora a disposizione più cammini (A e B) per arrivare allo stesso rivelatore.

In termini quantistici si dice che la particella si *delocalizza* nei due cammini A e B: potenzialmente è come se essa li esplorasse entrambi. I due cammini “potenziali” si sovrappongono come sorgenti ondulatorie coerenti, dando origine a interferenza. Ma attenzione questo *non* vuol dire che l'oggetto quantistico (elettrone, fotone) *si divide in due!!*

Ora inseriamo nei due rami due apparati non perturbativi che ci danno la *possibilità* di sapere da che parte è passato il fotone.



Se l'apparato consente di sapere da dove passa la particella si distruggono (collassano) le possibilità e questo distrugge anche l'interferenza. **Nota bene**: questo accade anche se la misura "*which way?*" non viene effettivamente registrata

Da un punto di vista matematico formale cambia il modo in cui si somma l'effetto dei singoli eventi

somma **coerente** → *interferenza*

somma **incoerente** → *no interferenza*

percorso A : $|A\rangle$ percorso B : $|B\rangle$

percorsi indistinguibili: $|A\rangle$ “e” $|B\rangle$

stato

$$|\psi\rangle = 1/\sqrt{2} (|A\rangle + |B\rangle)$$

probabilità:

$$||\psi\rangle|^2 = 1/2 (||A\rangle + |B\rangle|^2) \quad \text{coerente} \rightarrow \text{interferenza}$$

percorsi distinguibili: $|A\rangle$ o $|B\rangle$

$$|\psi\rangle = |A\rangle \quad \text{oppure} \quad |\psi\rangle = |B\rangle$$

$$||\psi\rangle|^2 = 1/2 (||A\rangle|^2) + (||B\rangle|^2) \quad \text{incoerente} \rightarrow \text{no interferenza}$$

Tutto ciò non ha nulla a che vedere con la perturbazione con cui Heisenberg aveva inizialmente interpretato l'indeterminazione. Si può invece interpretare con il *principio di complementarità di Bohr* : la conoscenza del cammino e gli effetti di interferenza sono due aspetti *complementari*, che non possono manifestarsi contemporaneamente.

Le interferenze ad una particella appaiono quando questa può utilizzare più cammini per arrivare allo stesso rivelatore, e nello stesso tempo questi cammini sono indistinguibili.

Questo è noto come *principio di indiscernibilità* e permette di prevedere, in un'esperienza di interferenza quantistica, se si avranno o meno gli effetti di interferenza.

In definitiva:

- Il *principio di complementarità* appare avere un ruolo più fondamentale del *principio di indeterminazione*.
- La configurazione dell' apparato sperimentale determina il modo in cui si manifesta la natura dell' oggetto quantistico che si studia.

Da qui la difficoltà a separare l' oggetto dello studio *in sè* dall' apparato sperimentale che serve a studiarlo e di riflesso anche da chi sta dietro a questo apparato sperimentale ...

.. ma stiamo dicendo sul serio che il fatto di comportarsi come onda o come particella dipende dalla nostra *soggettiva* decisione di come allestire l' **apparato sperimentale?**

Estremizzazioni linguistiche a parte, resta l' idea che il *soggetto* possa esercitare con l'atto della osservazione sperimentale un'influenza sulla natura dell' *oggetto* dell' indagine

Influenza che, è importante sottolinearlo, *non* avviene per effetto di una interazione basata sulle forze conosciute

Questi risultati, ancora più sorprendenti di quelli visti fin qui, mettono in crisi persino l'idea che esista una *realtà oggettiva* che si comporta in modo *indipendente* dal sistema che la osserva.

Questo ingresso del *soggettivismo* nella fisica ha creato ovviamente dibattiti e controversie a non finire, e non solo in campo strettamente scientifico, ma anche in quello filosofico.

Molti scienziati hanno cercato spiegazioni alternative ai fenomeni che abbiamo brevemente raccontato, cercando in particolare di salvaguardare l'idea che esista una realtà oggettiva, le cui proprietà non dipendono dal fatto di essere o meno osservate.

La messa in crisi del concetto di realtà oggettiva è il motivo principale per cui Einstein rifiutò fino all'ultimo di accettare che la meccanica quantistica fosse una teoria completa e definitiva. A questo proposito è famosa la frase in cui disse che gli piaceva pensare che la luna stesse lassù nel cielo anche quando lui non la guardava....

Non è qui il luogo di discutere se le varie interpretazioni alternative a quella ortodossa di Bohr e Heisenberg siano più o meno convincenti, o di entrare in maggiori dettagli.

Resta il fatto incontrovertibile che la meccanica quantistica suggerisce un livello di interazione tra gli elementi della realtà molto più profondo e complesso di quanto non ci sia possibile immaginare sulla base dell'intuizione e dell'esperienza quotidiana.

1. Elaborato con:
formulazione di una risposta (max 1 cartella A4) ad una domanda stimolata dal corso (da discutere/concordare nell'ultimo incontro). La risposta potrà essere formulata navigando nel sito (inclusa la consultazione di link esterni).

Criteri di valutazione:

- correttezza scientifica;
- ricchezza, problematicità e complessità della risposta.

I migliori elaborati saranno pubblicati sul sito, in una sezione appositamente costruita.

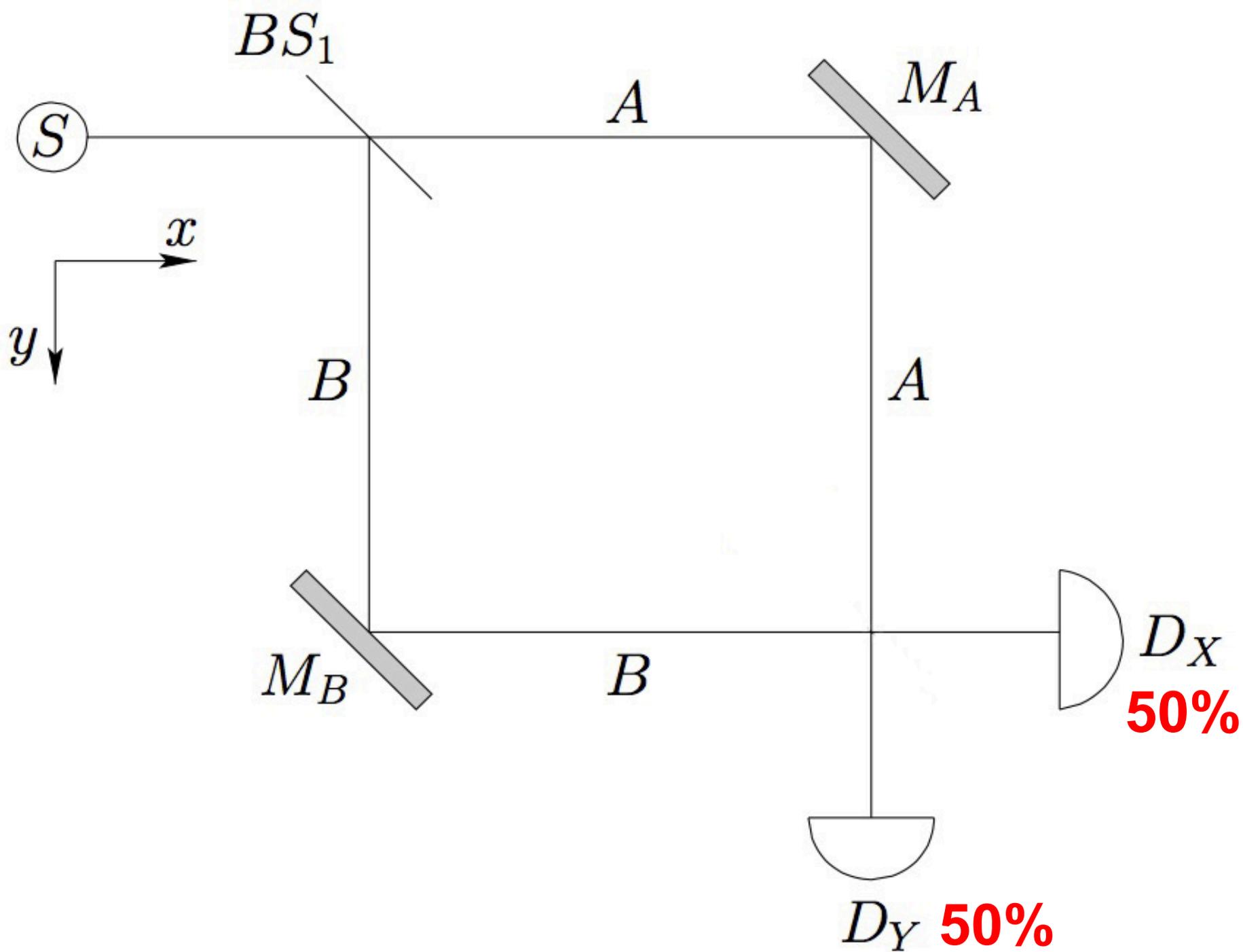
2. Feedback da sottomettere al sito - utilizzando la pagina "contact us" - in cui si dà una breve valutazione critica dell'esperienza di navigazione del sito, rispetto parametri come fruibilità, chiarezza immediatezza, facilità a trovare le cose, etc.

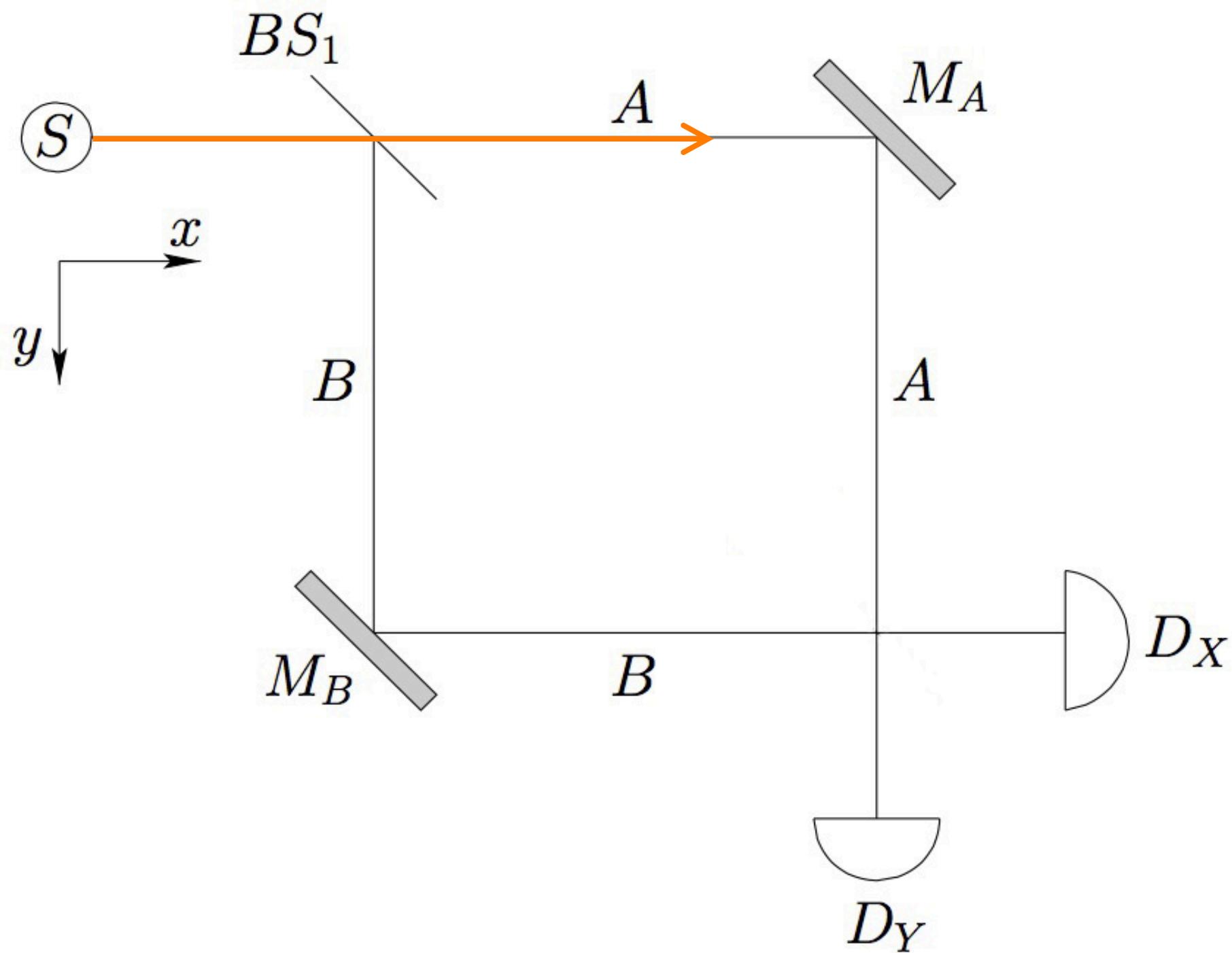
Criteri di valutazione:

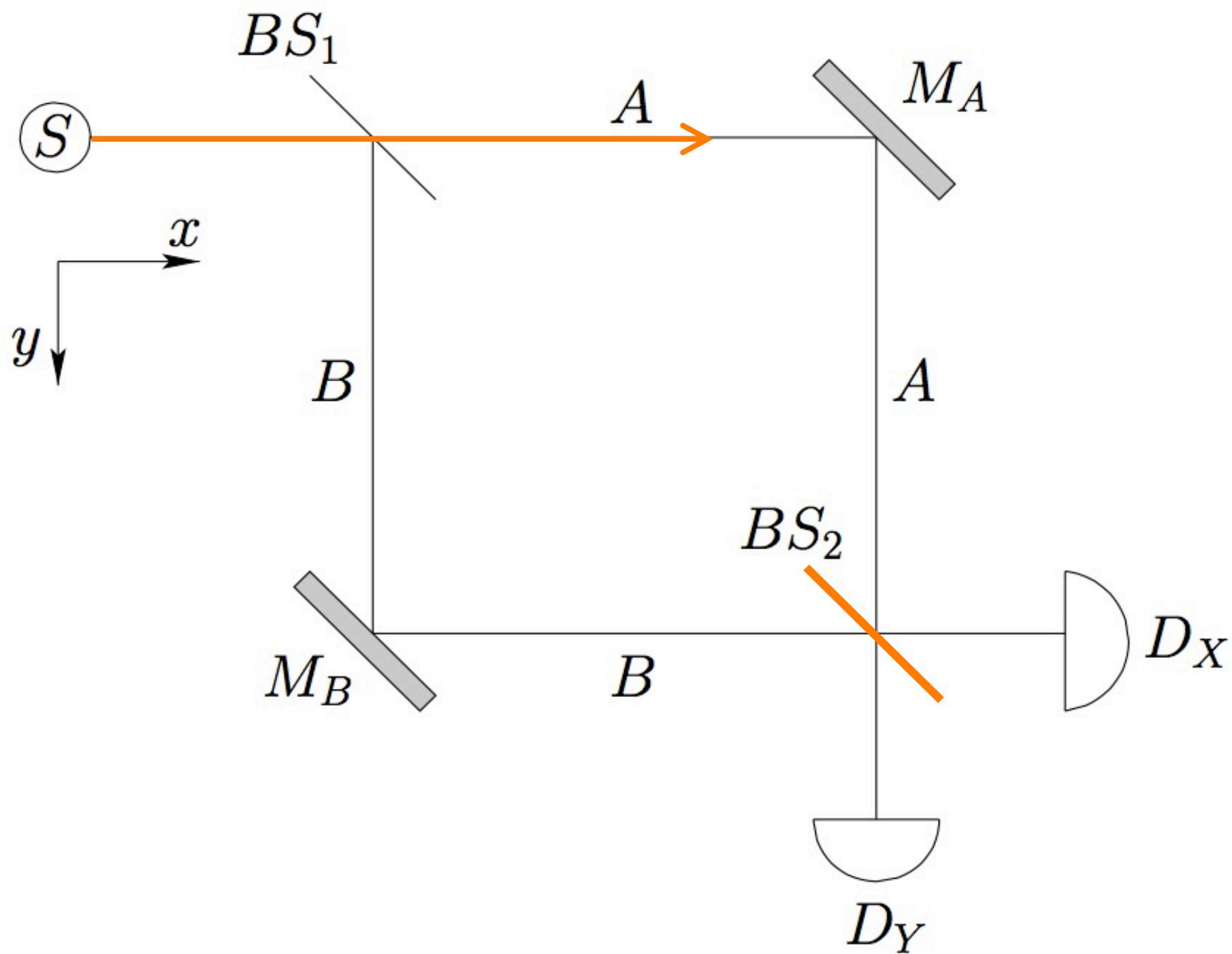
- spirito critico e pertinenza della critica.

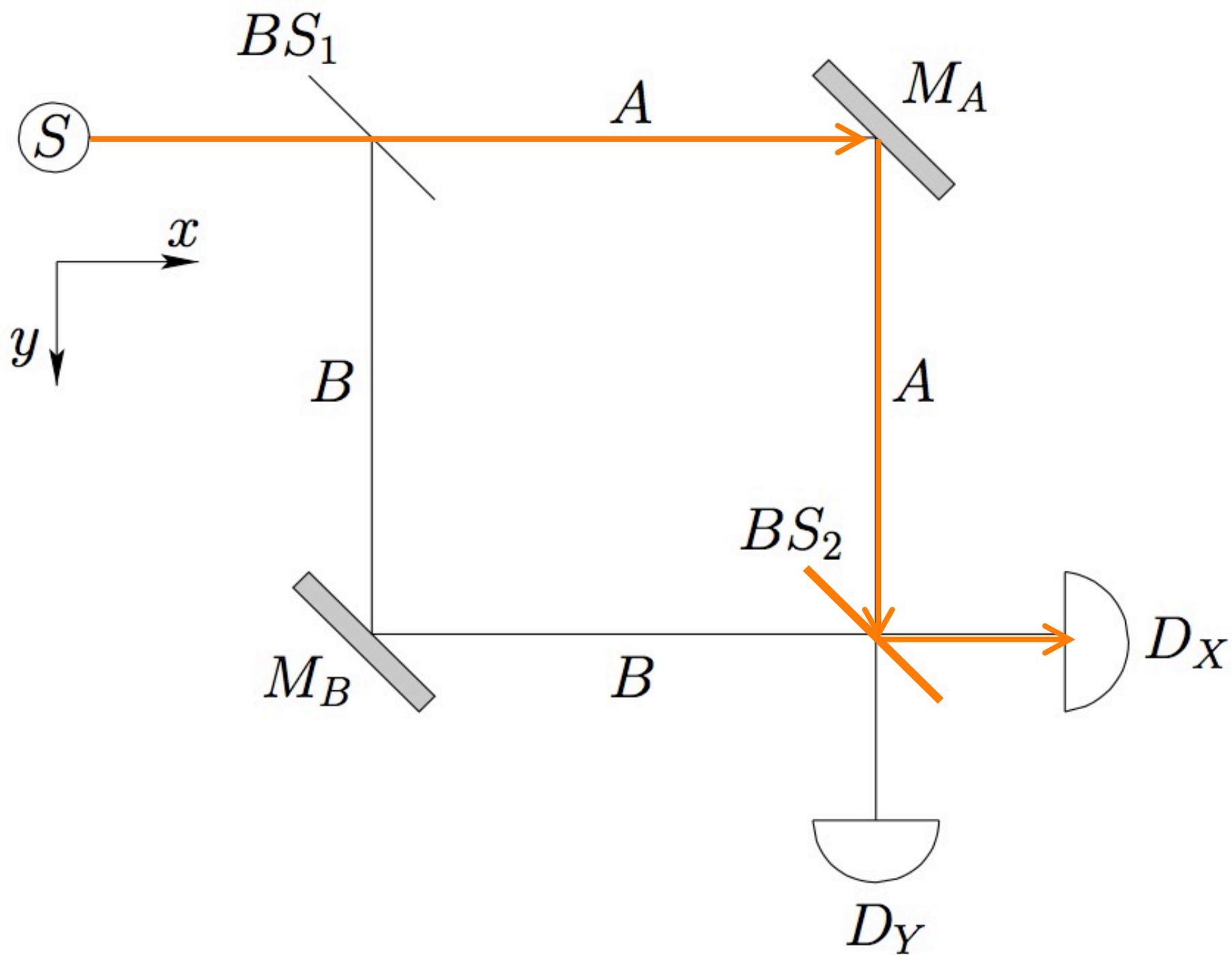
Un altro passo nelle stranezze della fisica quantistica

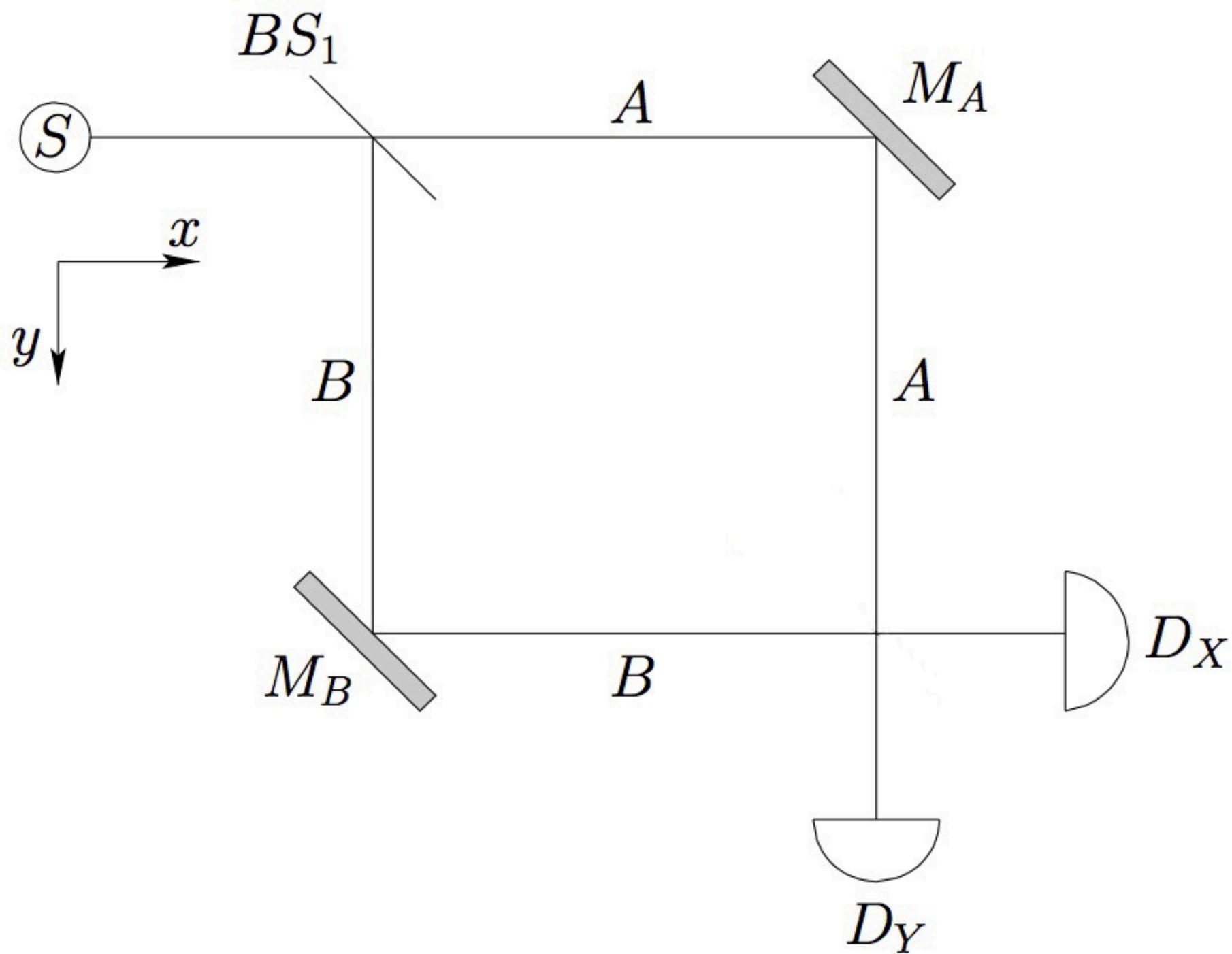
Scelta “ritardata”

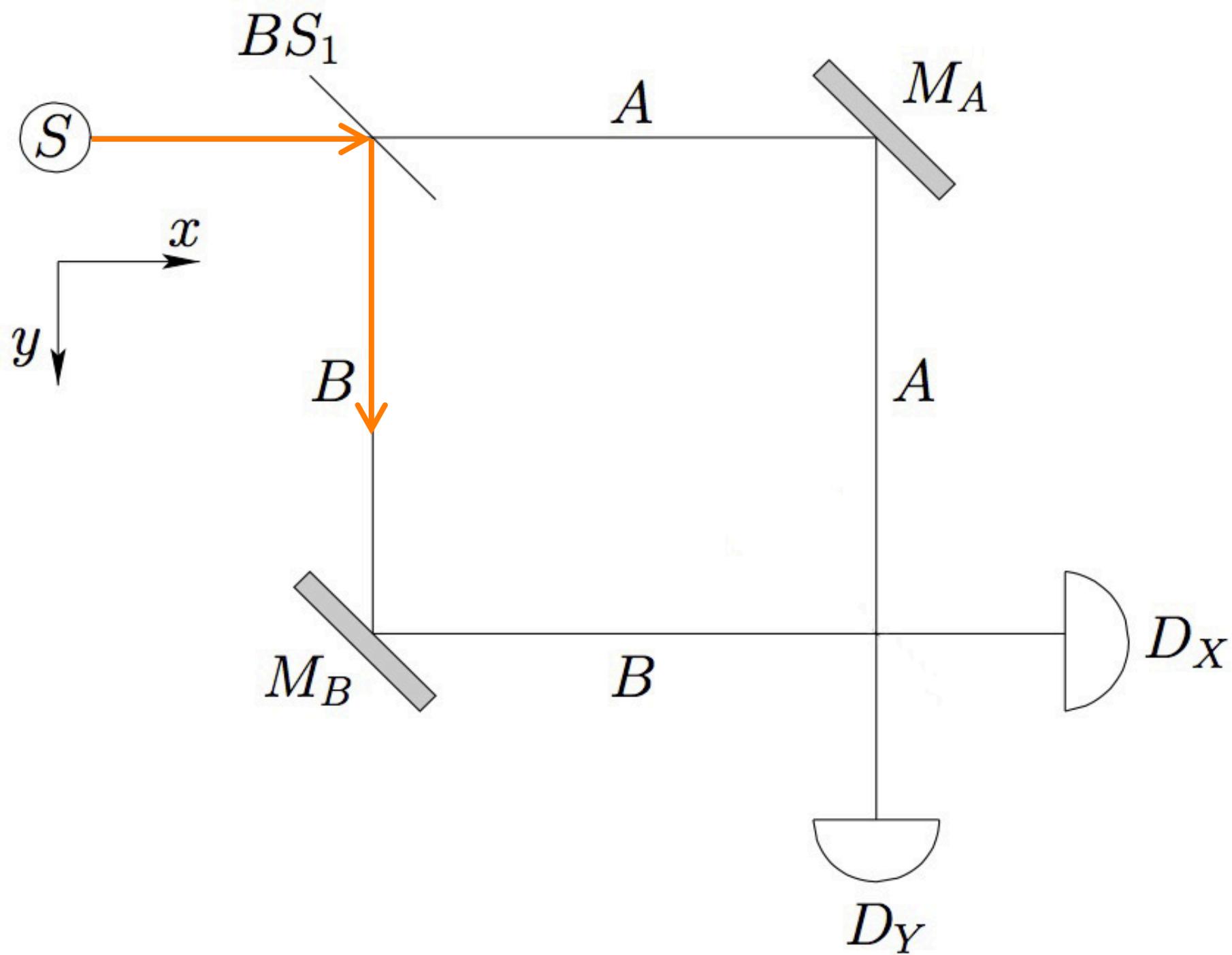


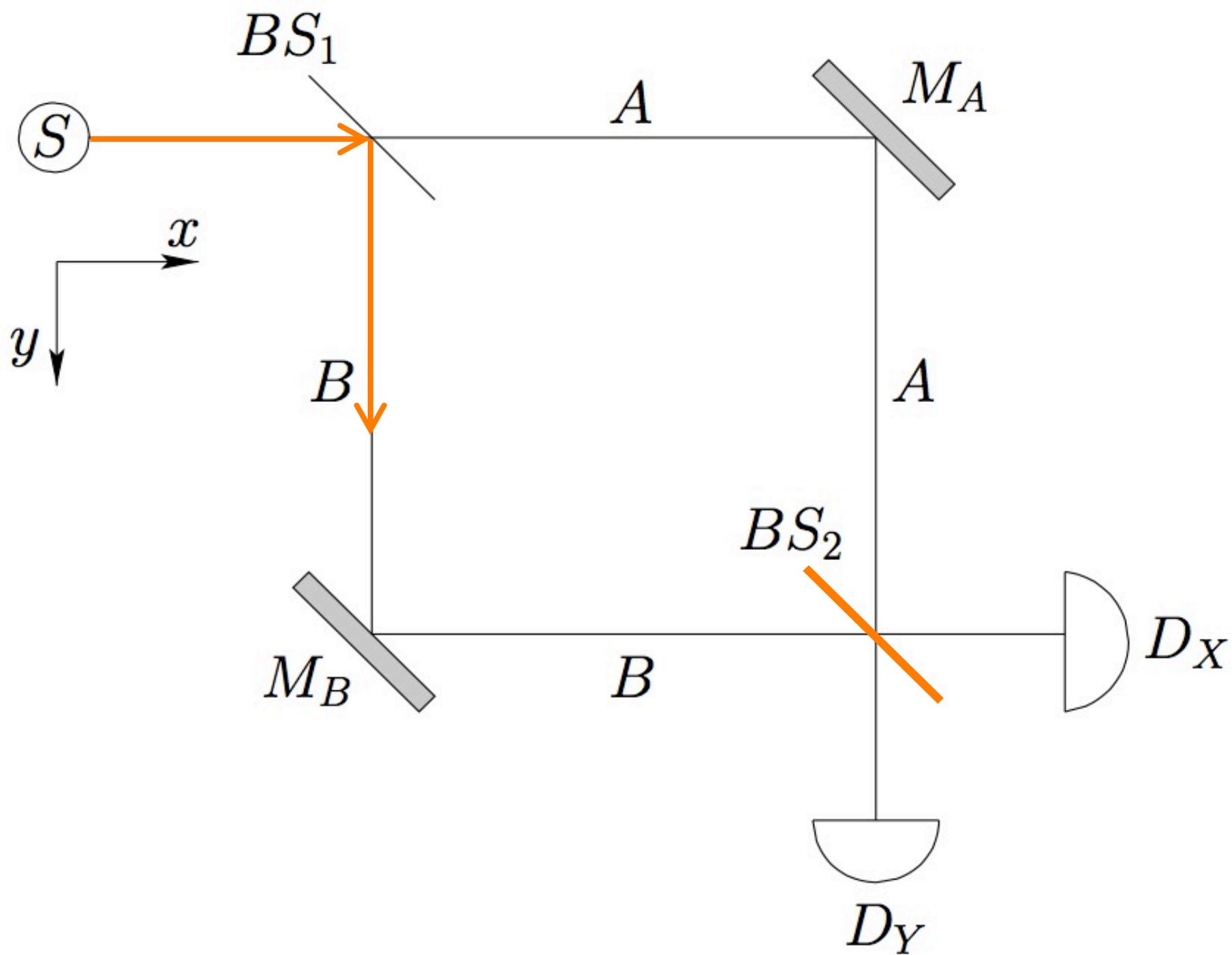


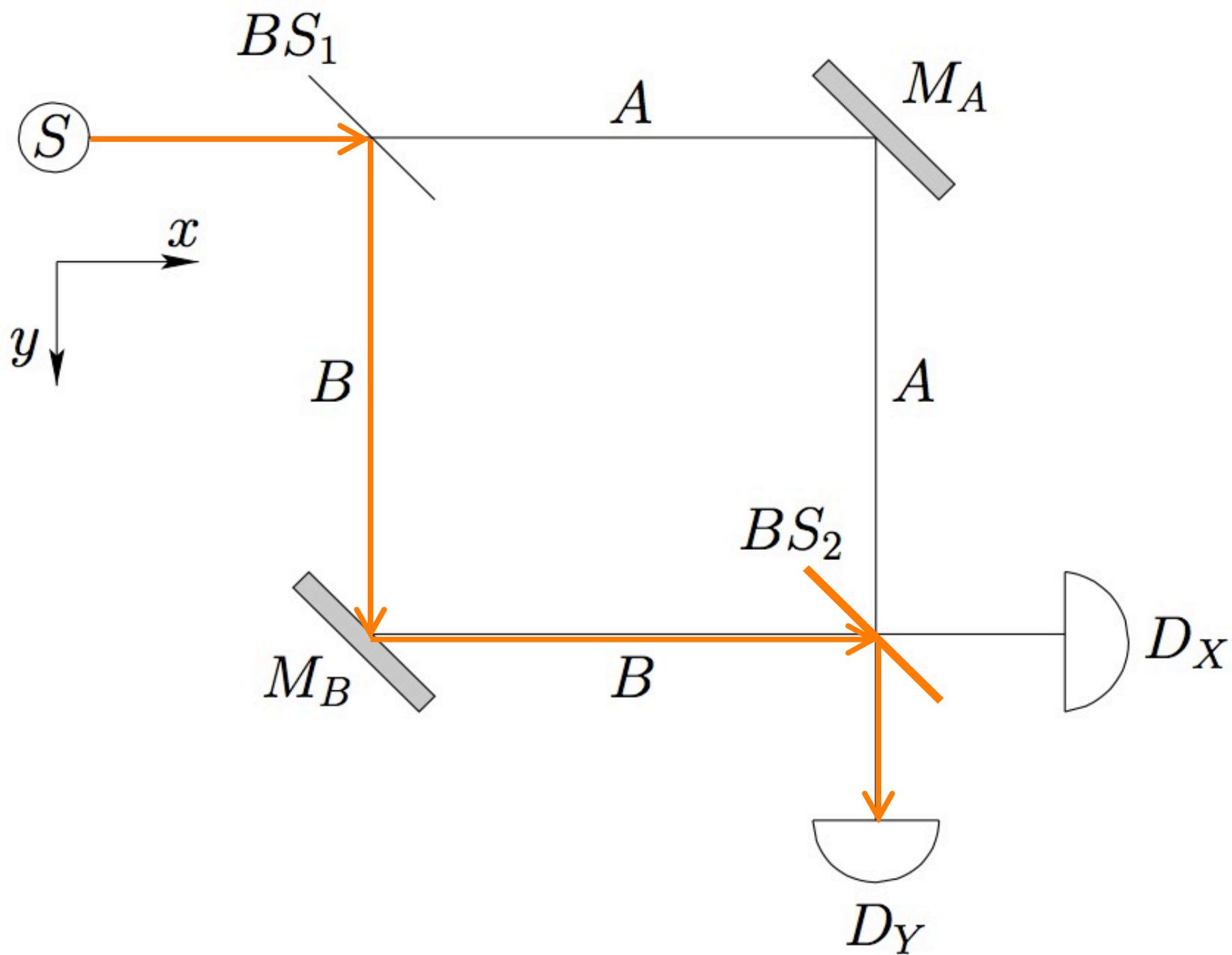


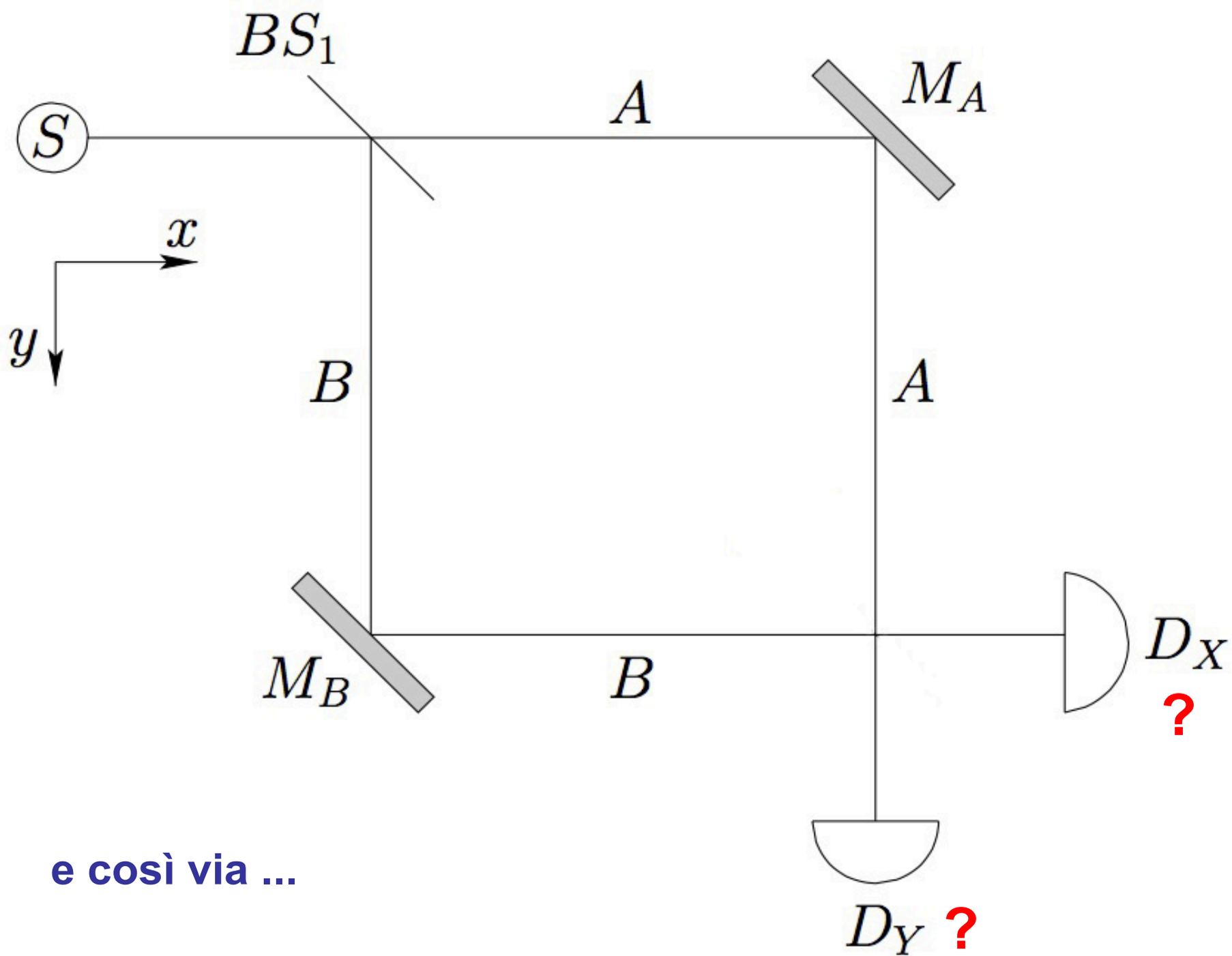




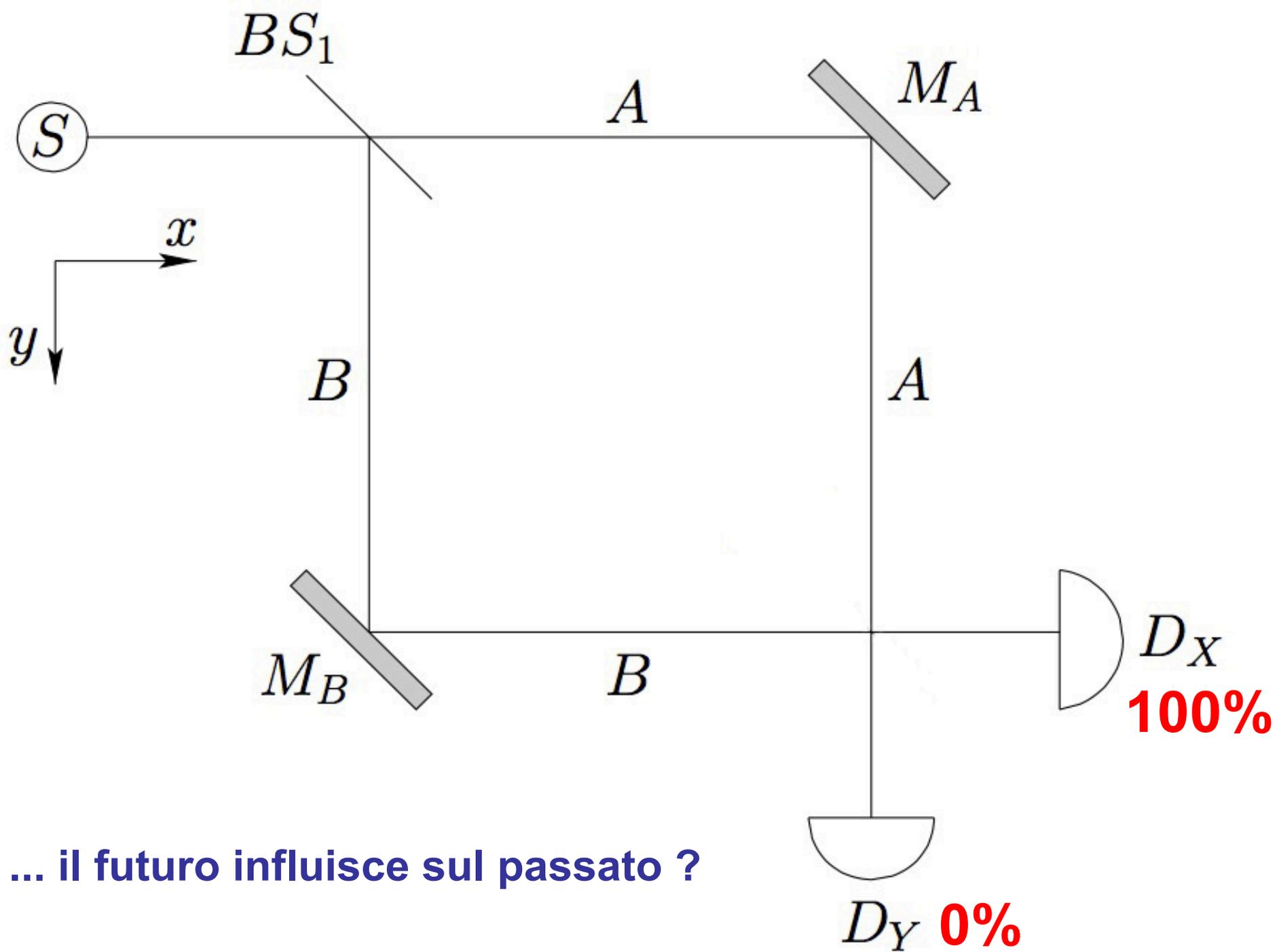








e così via ...



... il futuro influisce sul passato ?