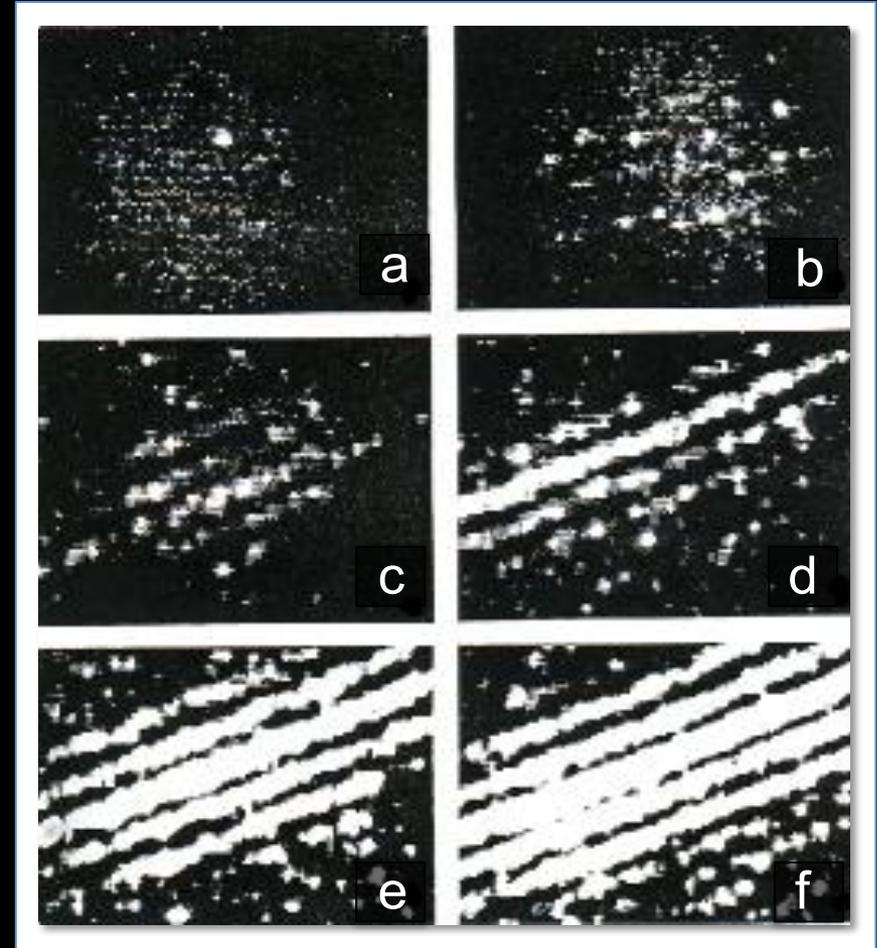


# Esperimenti “*which path*”? e interferenza quantistica

*Giorgio Lulli*  
*CNR-IMM Bologna*

## Riepilogando l'EPB (secondo Merli, Missiroli e Pozzi)

- ogni elettrone singolo viene *sempre* rivelato come **particella**
- Il cosiddetto “comportamento ondulatorio” (frange) non è evidente dall'osservazione di pochi elettroni (a,b), ma si manifesta solo con l'osservazione di *molti elettroni* (>1000) (e,f) ⇒ effetto **statistico**
- la **probabilità** di arrivo degli elettroni sullo schermo segue una distribuzione matematica del tutto analoga a quella della distribuzione di intensità nell'interferenza classica delle **onde...** e dunque *onda sì, ma di probabilità*



... ma cosa spinge ogni **singolo** elettrone a seguire questa distribuzione?

## Interferenza classica *versus* interferenza quantistica

**interferenza classica:** il sovrapporsi di due fenomeni cooperanti e il conseguente sommarsi o elidersi dei loro effetti

(vocabolario Treccani online)

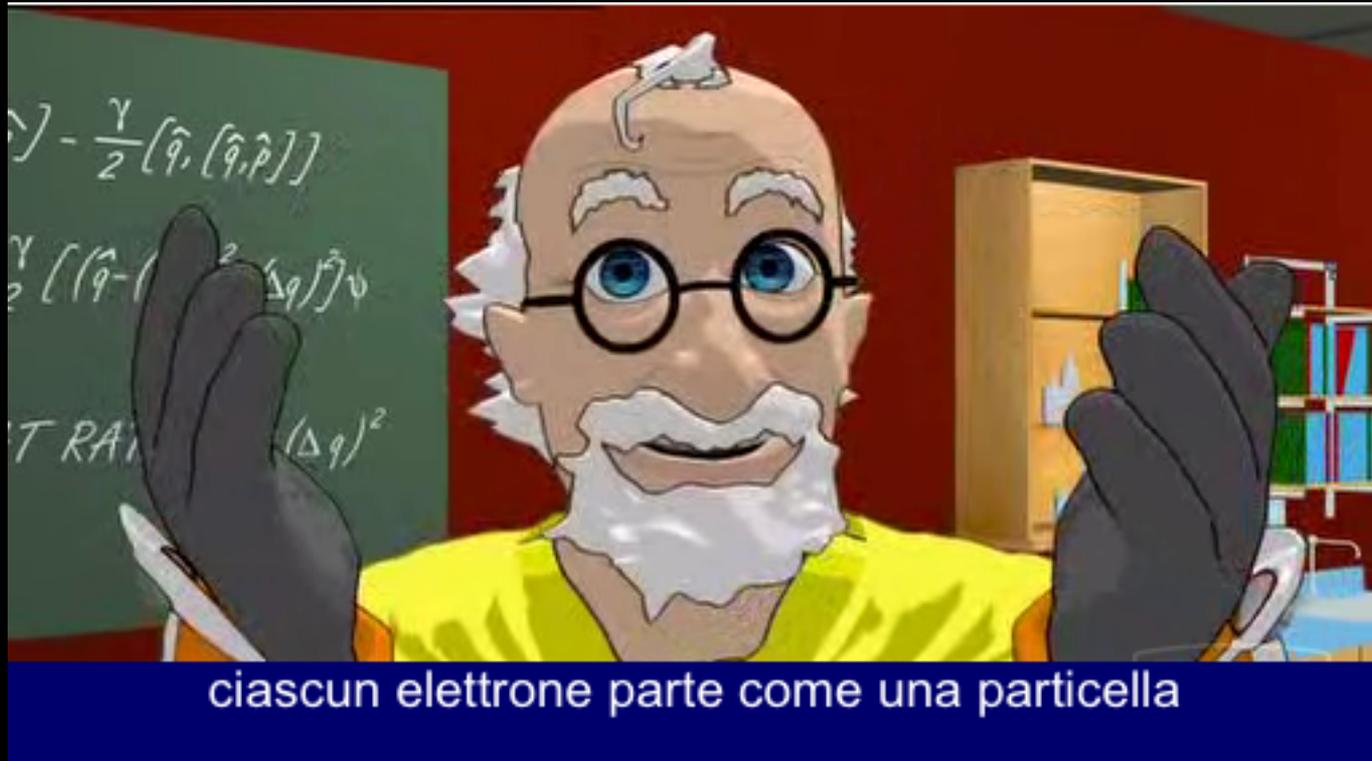
- classicamente, per interferire ci vogliono minimo *due* sorgenti
- qui mandiamo *un solo* elettrone/fotone per volta
- cosa interferisce con cosa?



*"ogni fotone [o elettrone]  
interferisce con sè stesso"*

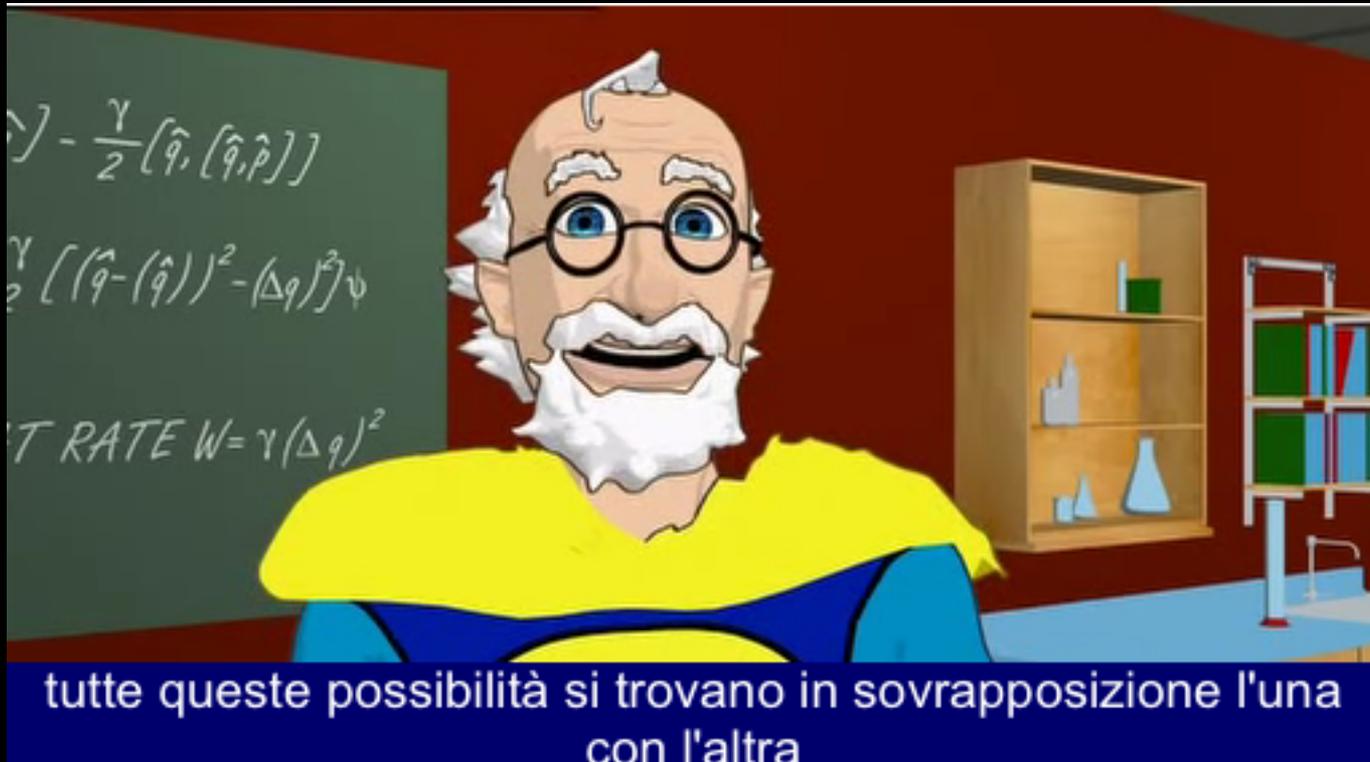
**Paul M. Dirac** *I principi della meccanica  
quantistica* (Boringhieri, 1959) p.13

## Un modo “naif” di visualizzare il fenomeno ..



Dr. Quantum (*The infamous double slit experiment* - YouTube)

## Quale percorso? (*which path? o which way?*)



Dr. Quantum (*The infamous double slit experiment - YouTube*)



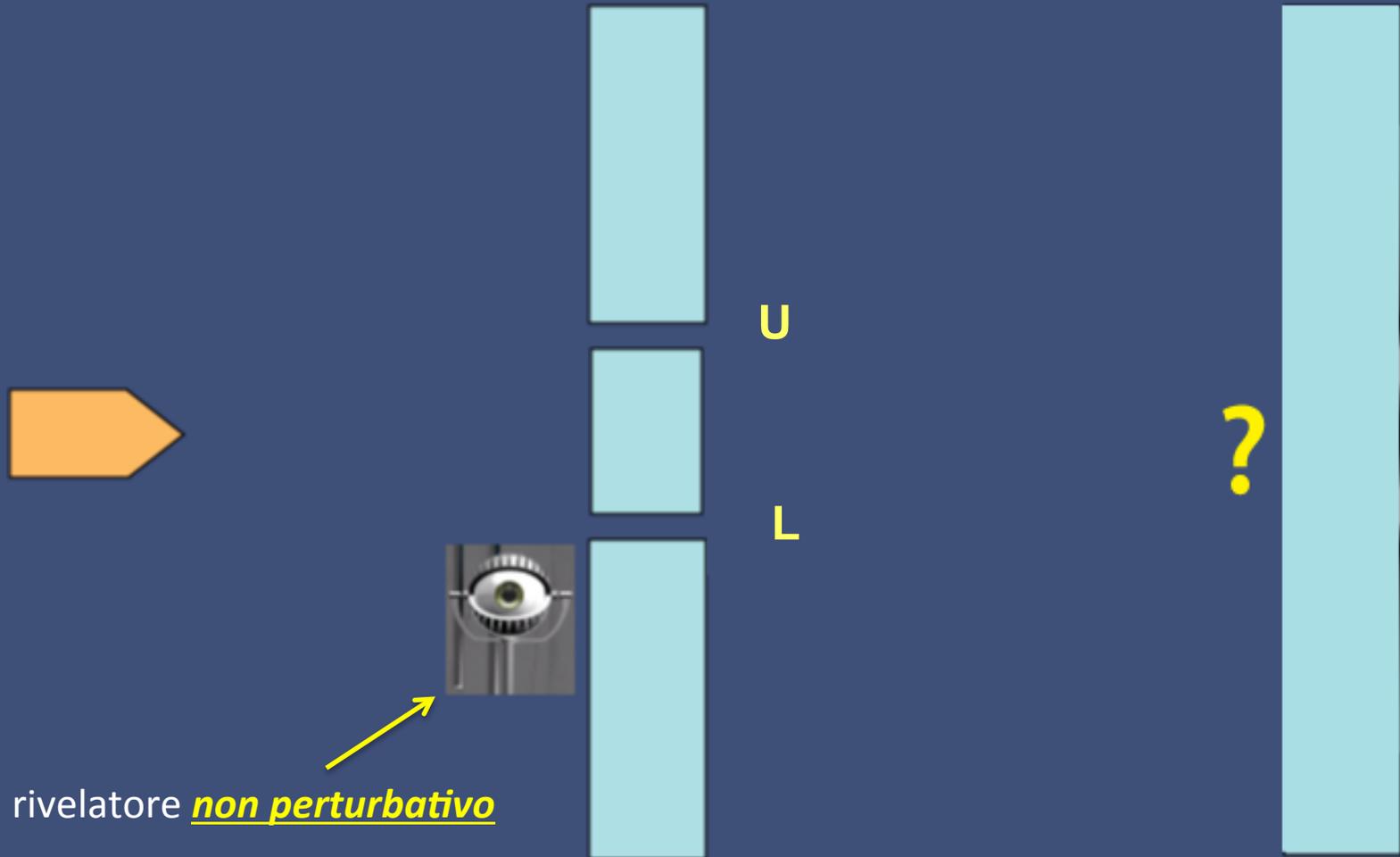
U

L



**U**(pper) e **L**(ower) esistono come possibili alternative, non sperimentalmente distinguibili.

# “vedere” di più: esperimento *which way?*

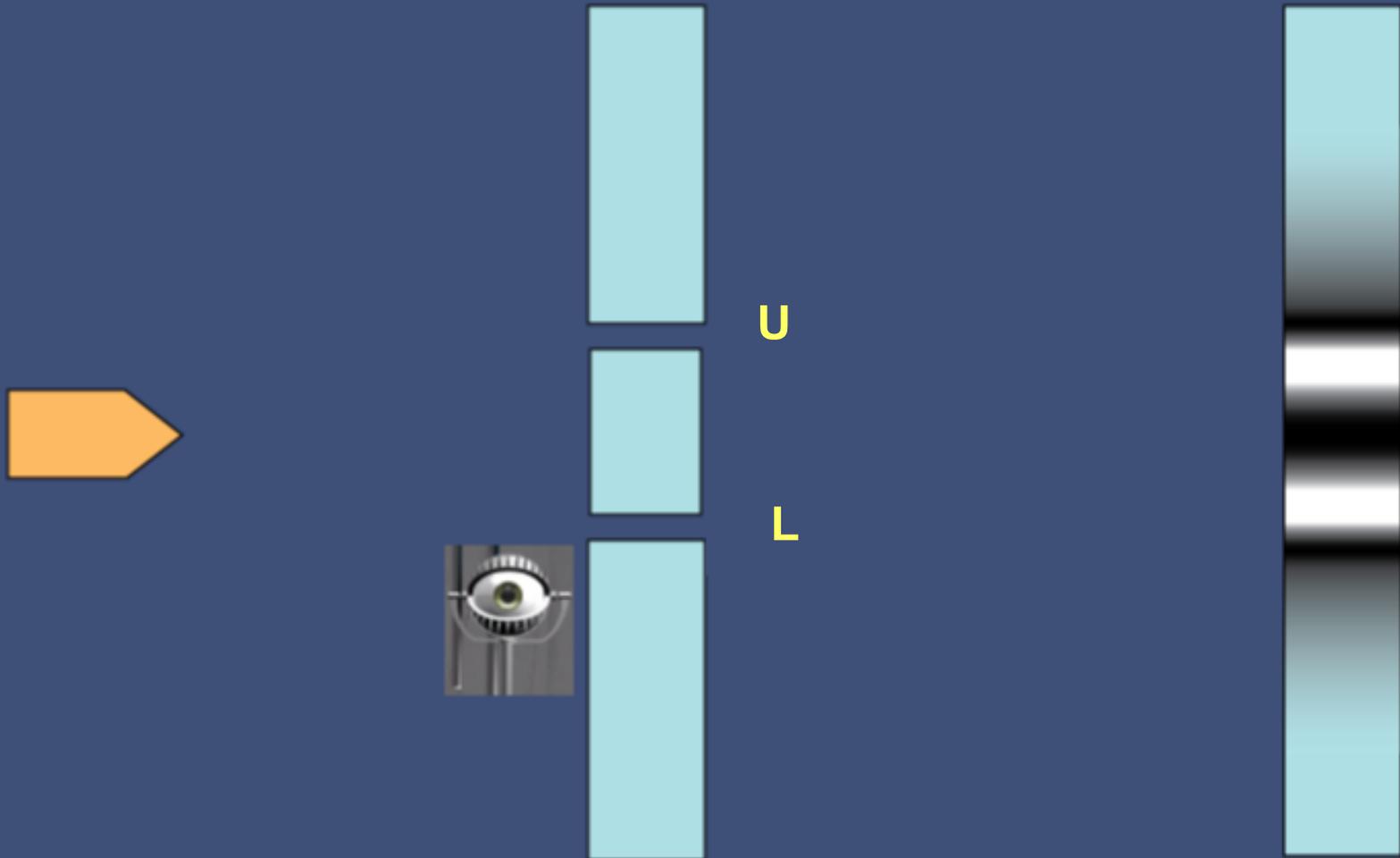


rivelatore *non perturbativo*

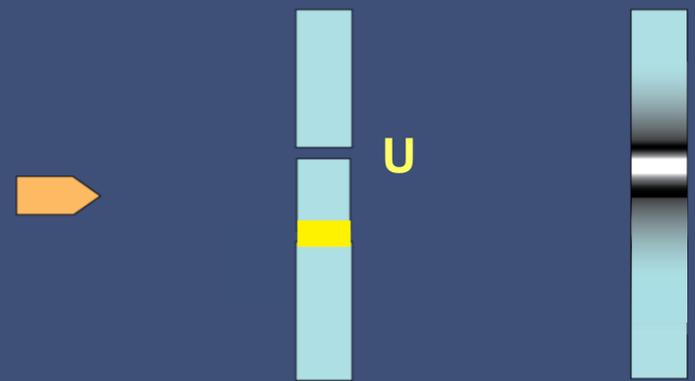
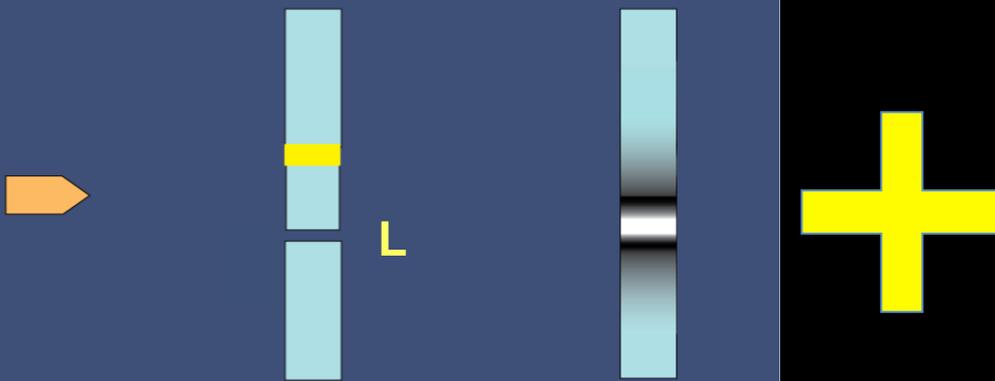
**1991:** proposto per la prima volta un esperimento concettuale simile, con atomi anziché elettroni: *Scully et al. Nature 351, 111, 1991*

**1998:** esperimento di Scully realizzato nella pratica : *Durr et al. Nature 395, 33, 1998*

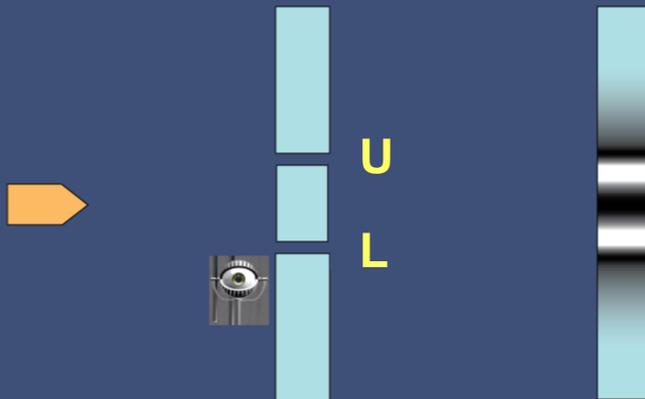
“vedere” di più: esperimento *which way?*



sparisce l'interferenza!

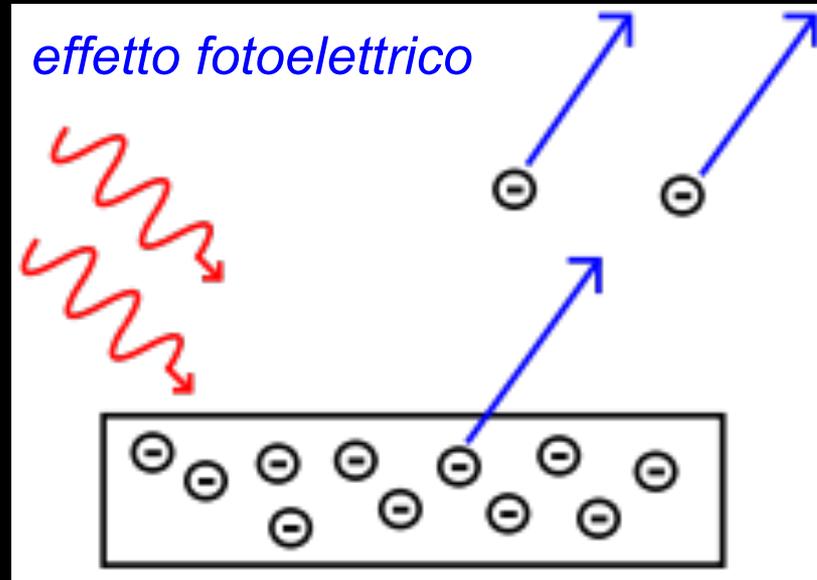
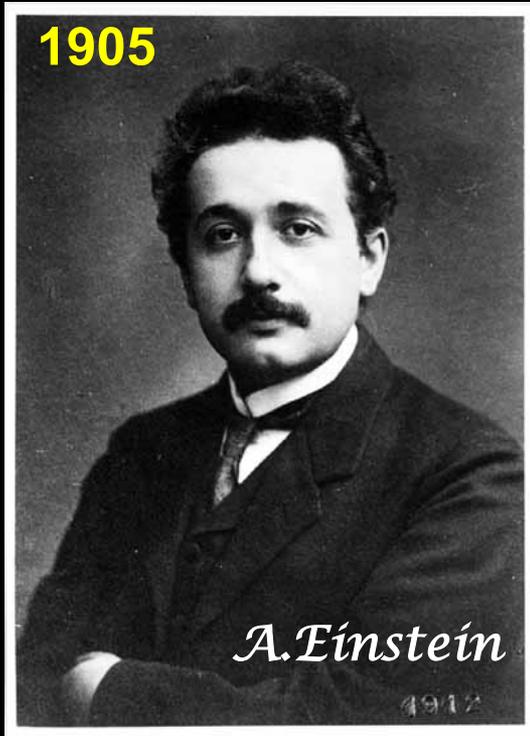


“vedere” di più: esperimento *which way?*



si combinano le *intensità* delle figure prodotte da ciascuna fenditura, *considerate separatamente* ...

La luce mostra comportamenti ondulatori o corpuscolari (**fotone**) in modo del tutto analogo agli elettroni.



luce = particelle (**quanti di luce o fotoni**)

## Ottica quantistica e esperimenti *which path?*

L'esperimento di *interferenza di fotoni singoli* dà un risultato equivalente a quello di interferenza di elettroni singoli (ma lo stesso accade con *neutroni*, *atomi*, persino *molecole*..)

I fotoni sono gli oggetti quantistici più utilizzati negli esperimenti – e nelle *applicazioni* – dagli anni 1990 ad oggi.

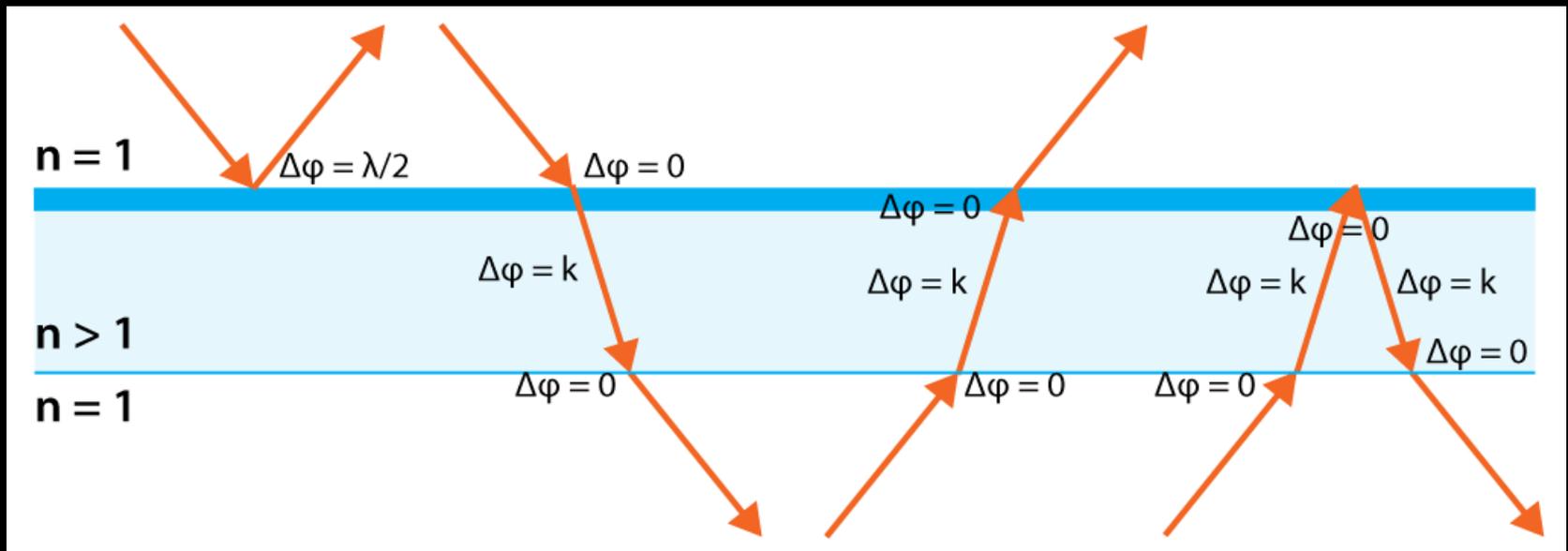
# Costituenti principali di un esperimento di ottica quantistica con *interferometro Mach-Zehnder*



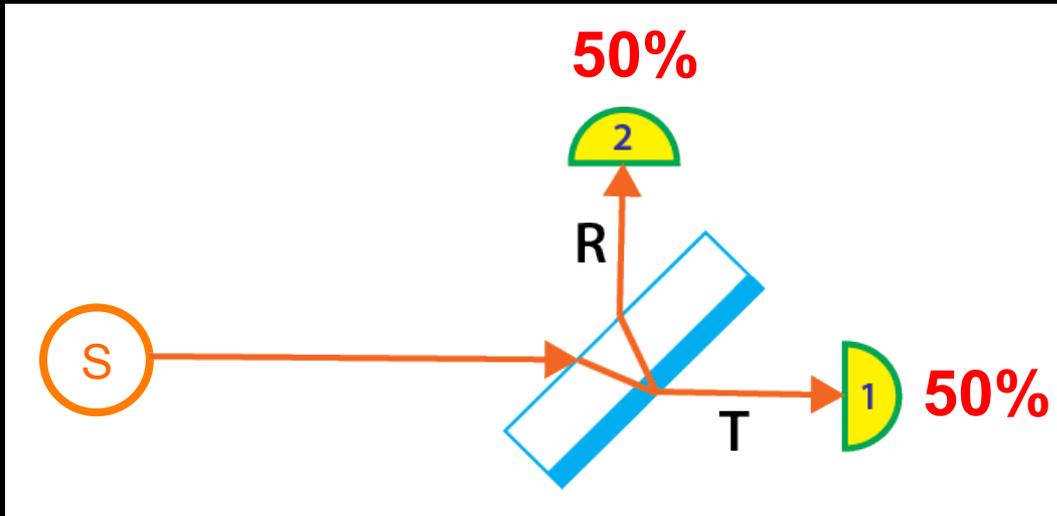
- emettitori e rivelatori di fotoni singoli
- specchi riflettenti e semi-riflettenti (*beam splitter*)
- sistemi *non perturbativi* per “marcare” il passaggio di un fotone

## Specchio semi-riflettente o beam splitter (BS)

- un fotone ha probabilità **50%** di essere riflesso e **50%** di essere trasmesso (un fascio di luce passa per metà, per metà viene riflesso)
- classicamente, la *fase* di un'onda luminosa viene modificata a seconda del percorso

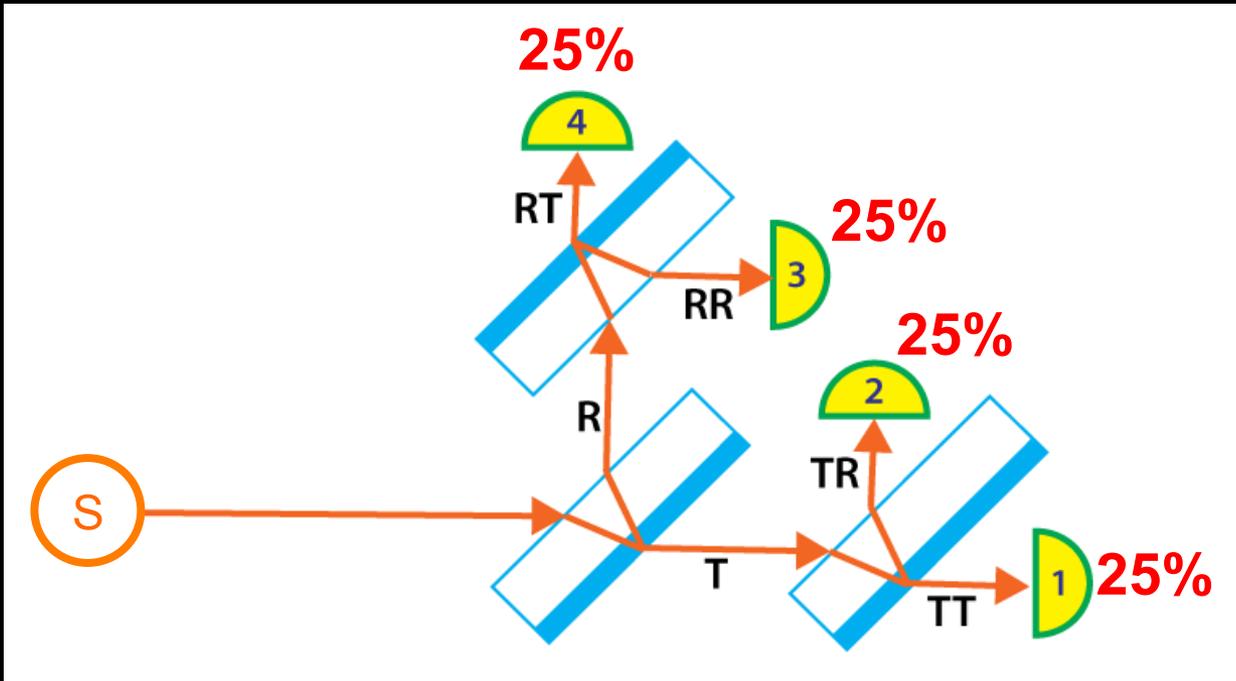


## Specchio semi-riflettente o beam splitter (BS)



- mandiamo un solo fotone alla volta
- ogni fotone viene sempre rivelato *come conteggio* in *un solo* rivelatore (un fotone non si spezza mai in due !)
- la probabilità di arrivo nei 2 rivelatori è del 50%

## Variante

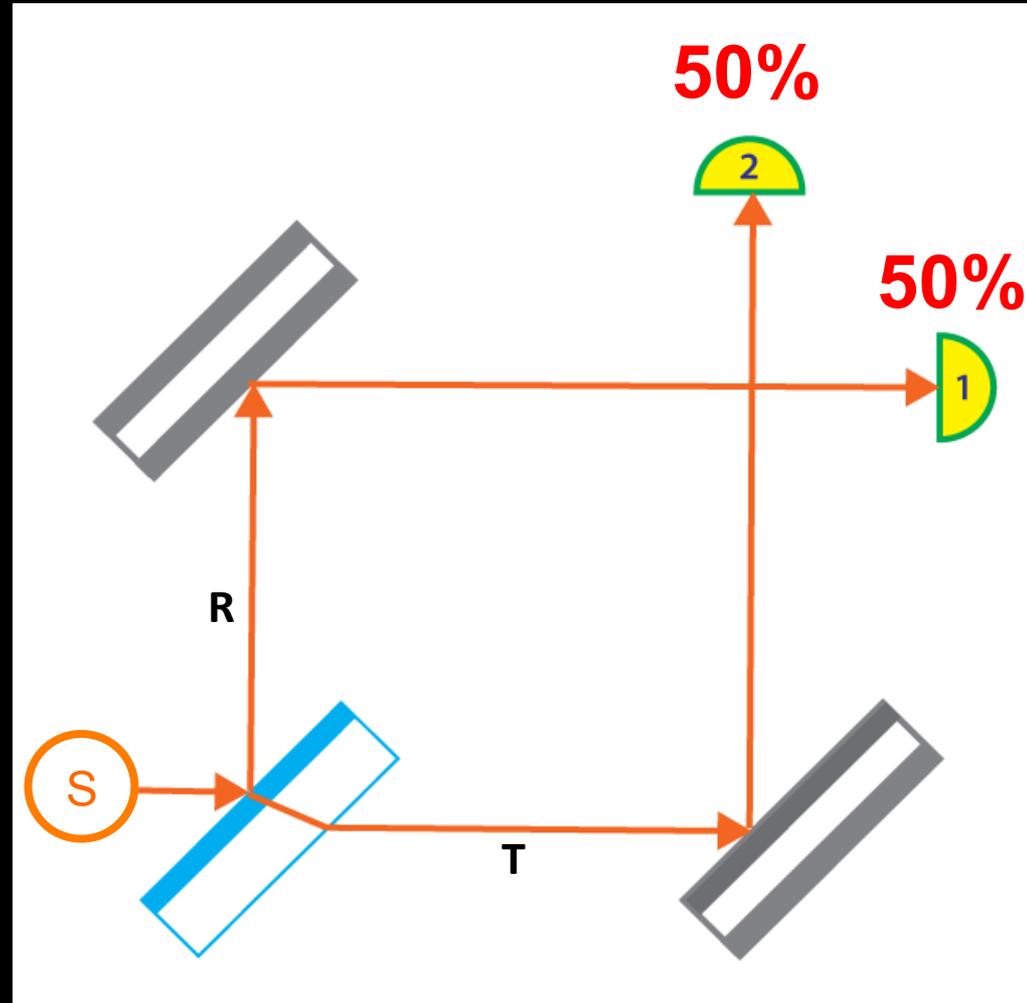


Quali sono le probabilità di arrivo dei fotoni nei rivelatori 1,2,3,4?

setup cosiddetto  
"classico"

Come il primo caso, con  
in più due normali specchi  
riflettenti, che non  
cambiano le condizioni  
dell'esperimento

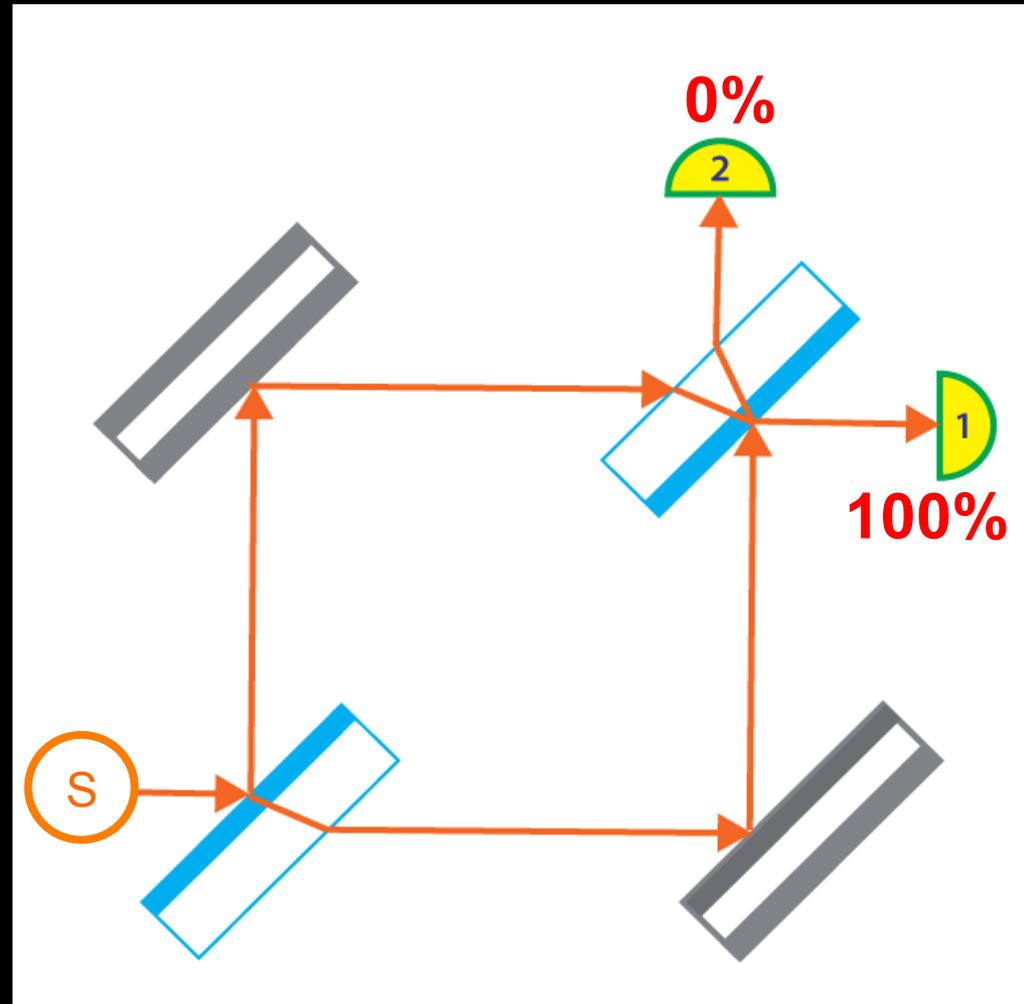
**stesso risultato**



setup cosiddetto  
“quantistico”

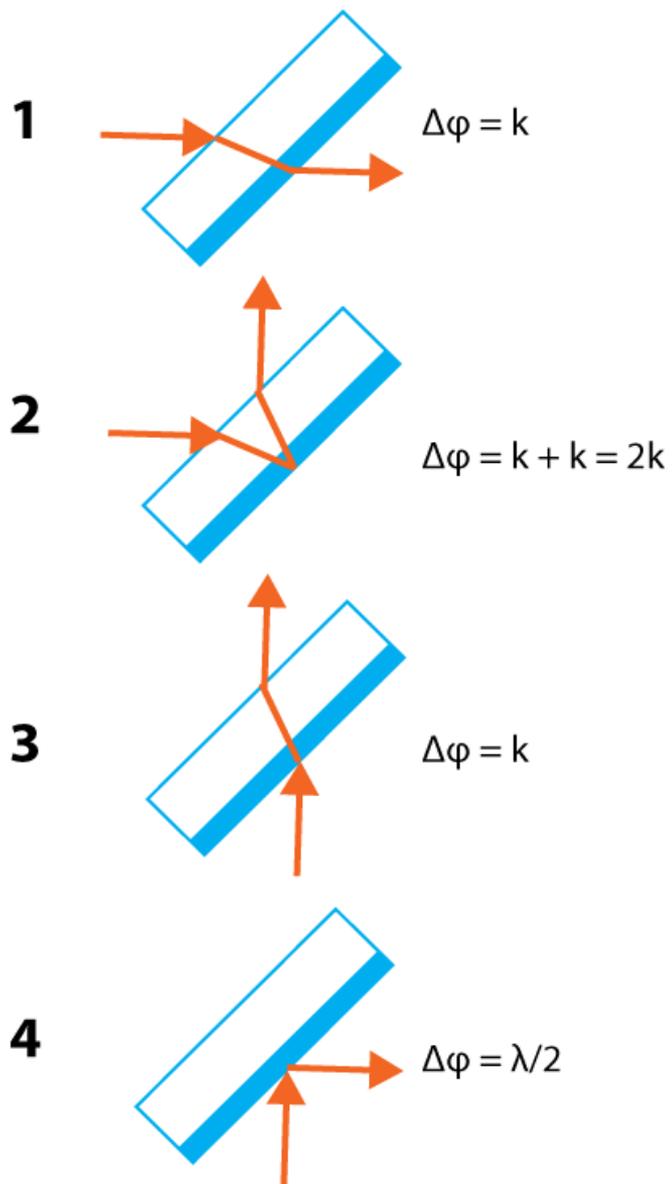
introduzione di un secondo  
beam-splitter:  
interferometro **Mach -  
Zehnder**

... stesse modalità di  
prima: cosa troviamo?

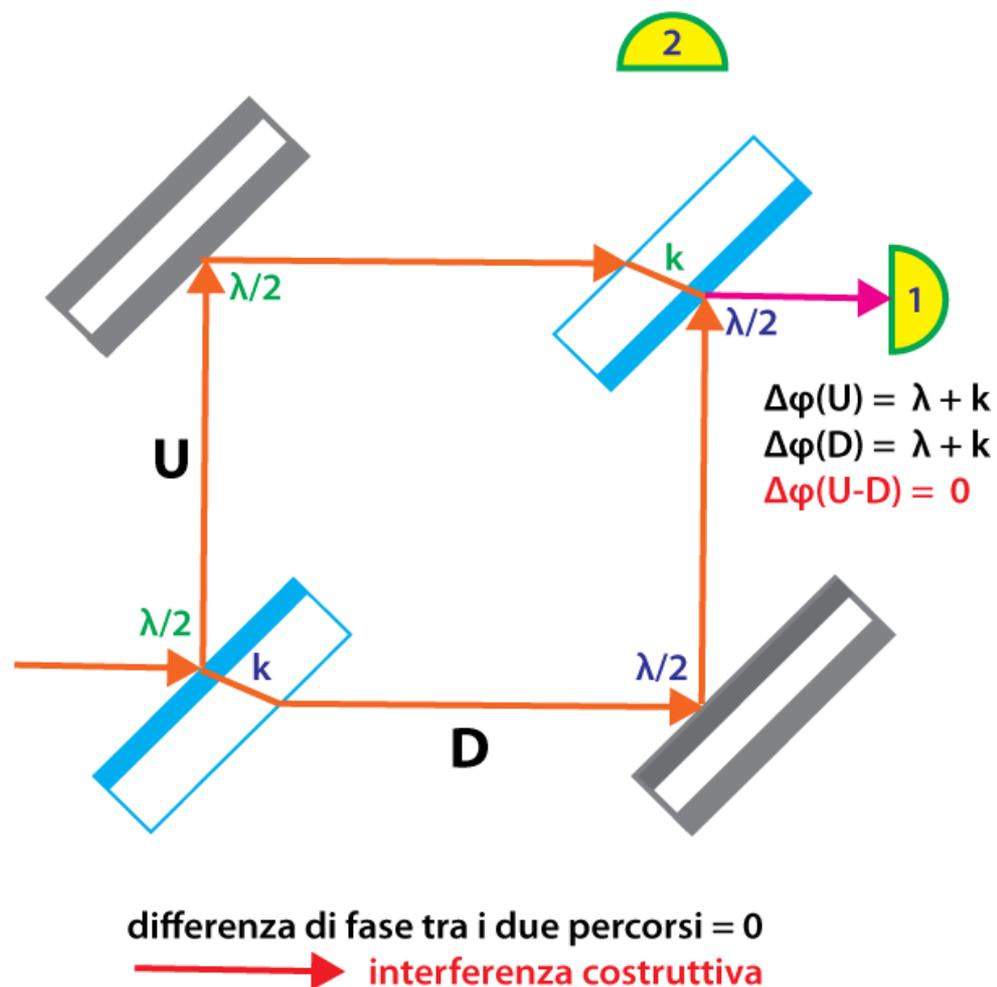


l'osservazione non si spiega ragionando sui fotoni come particelle ...

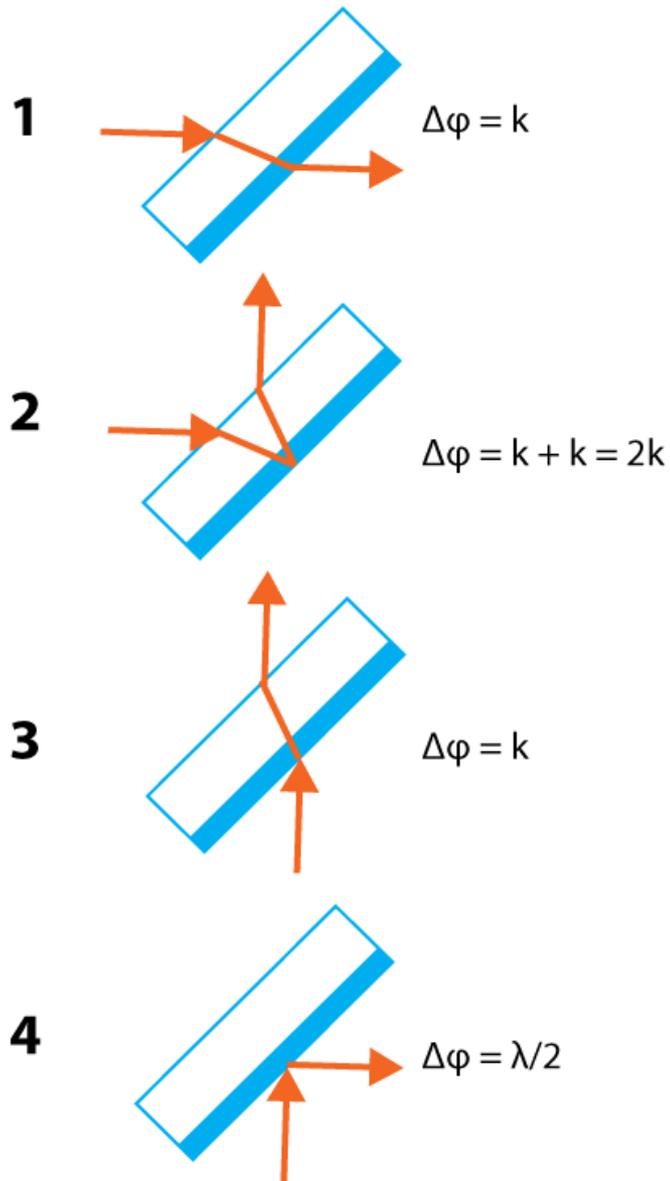
# effetto "ondulatorio" $\Rightarrow$ interferenza



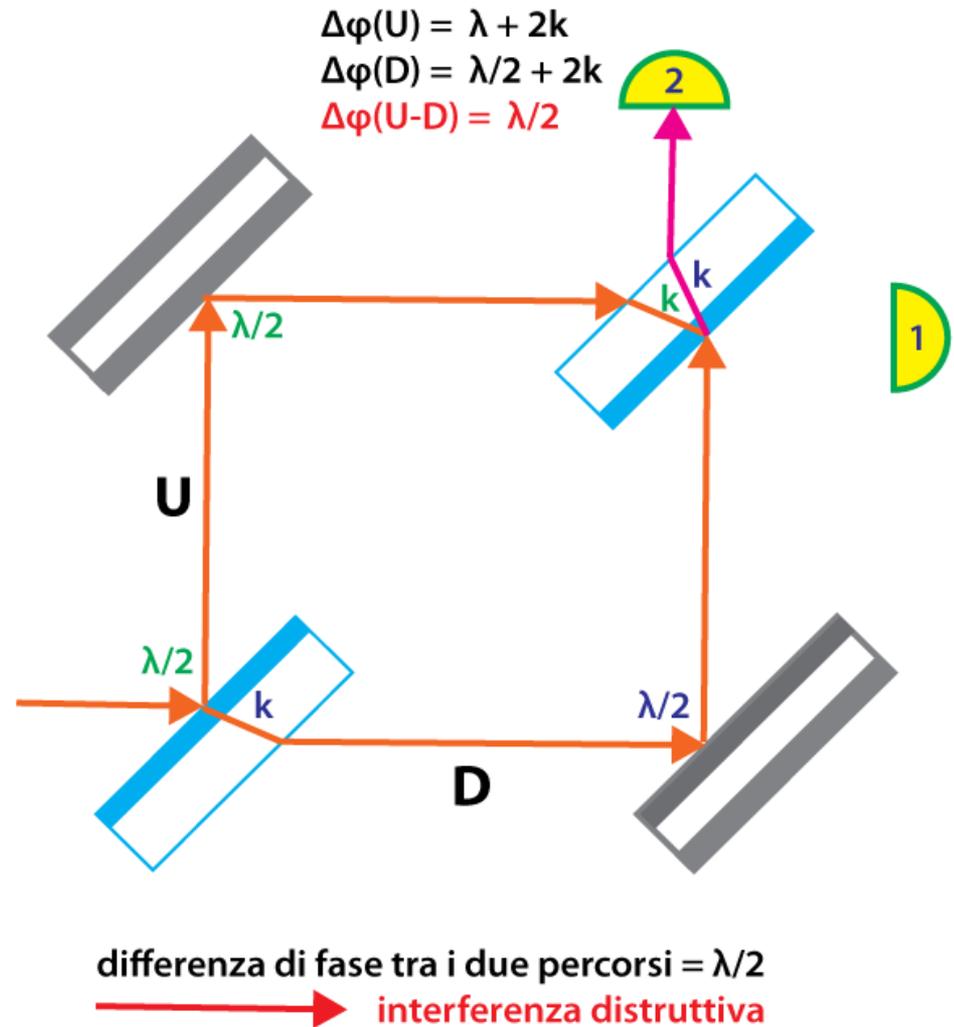
## situazione al rivelatore 1



# effetto "ondulatorio" $\Rightarrow$ interferenza



## situazione al rivelatore 2



Cosa è cambiato con l'inserimento del secondo BS? Che un fotone ha ora a disposizione **2 possibilità (U e D)** per arrivare a ciascun rivelatore.

L'interferenza quantistica appare la conseguenza della **sovrapposizione di queste due possibilità** (*ecco il senso della frase di Dirac!*)

Queste possibilità non sono “onde” reali, in senso classico, ma entità matematiche, dal significato probabilistico (*funzioni d'onda* o “onde di probabilità”)

Ciò che sta alla base dell'effetto osservato è quindi il **principio di sovrapposizione**, che in fisica quantistica si applica ai possibili “**stati**” dell'oggetto quantistico.

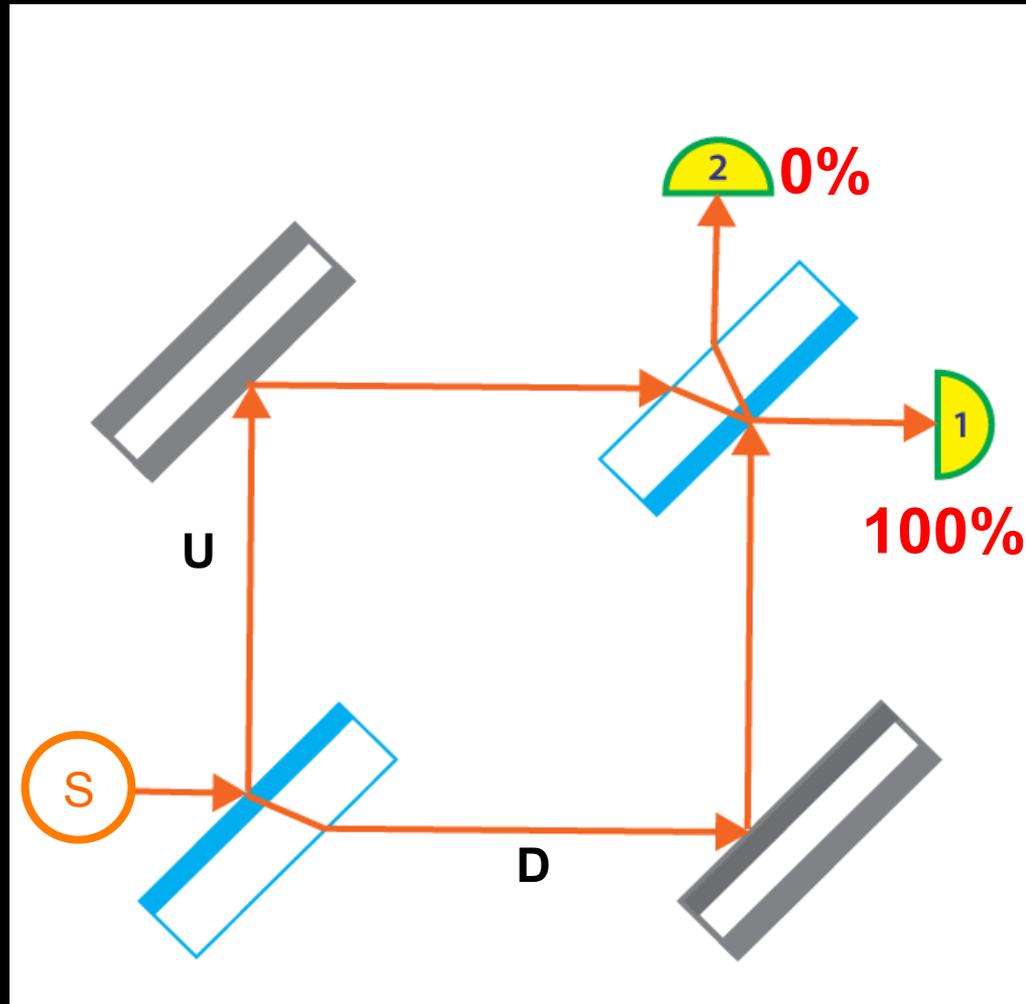
L'interferenza è una **conseguenza** di tale principio generale e si osserva in alcuni particolari esperimenti (2 fenditure, interferometro Mach-Zehnder, ..)

Vi sono esperimenti in cui si evidenzia la sovrapposizione quantistica degli stati, ma che non comportano necessariamente interferenza – vedi lezioni successive ...

Immaginiamo adesso di fare un passo ulteriore e voler identificare da che parte è passato il fotone con un esperimento “*which path?*”.

A questo proposito inseriamo un apparato-rivelatore *non perturbativo* che ci dia la possibilità di ottenere questa informazione, “marcando” in qualche modo riconoscibile i fotoni passati per U e quelli passati per D.

# esperimento *which path?*

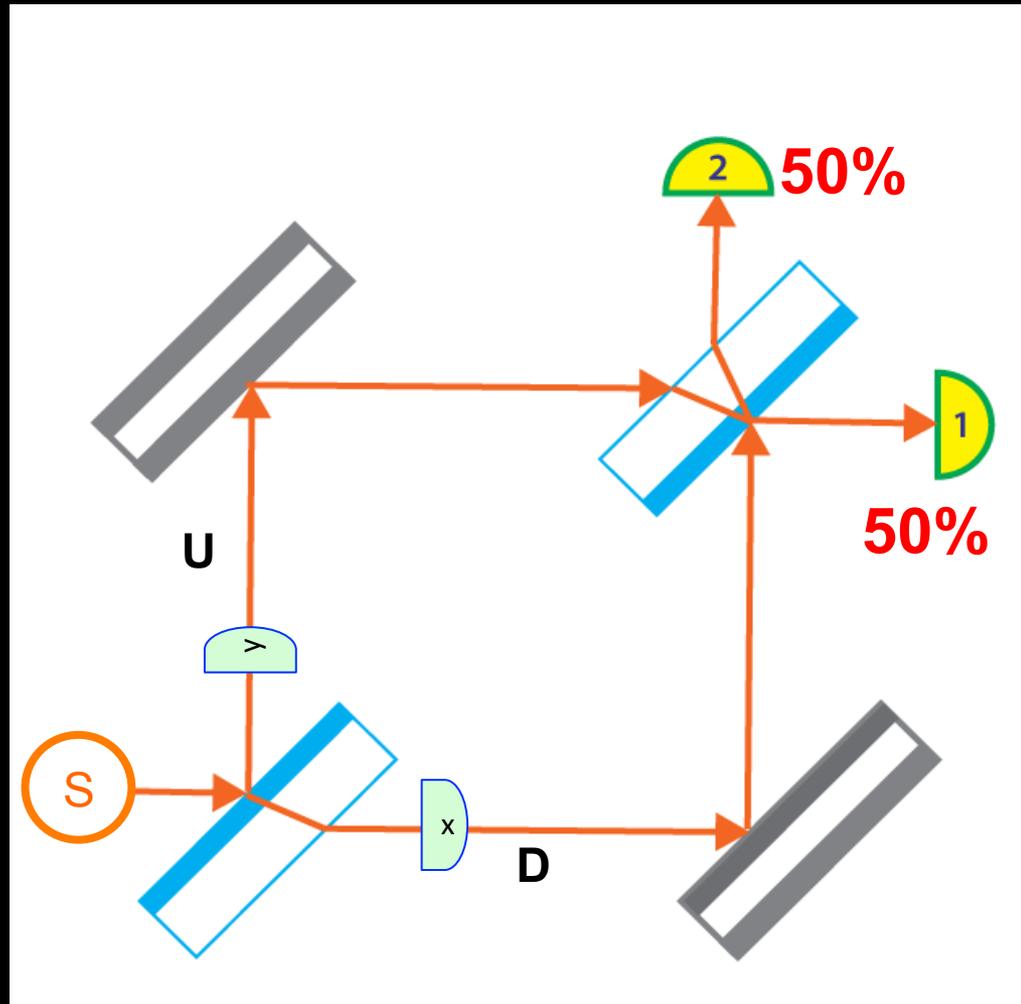


## esperimento *which path?*

Se l'apparato permette di sapere da dove passa il fotone vengono meno le 2 possibilità e questo distrugge l'interferenza.

**Nota:** questo accade anche se la misura "*which path?*" non viene effettivamente registrata ....

(non è la *lettura* della misura, ma la *possibilità di farla*, legata al set-up sperimentale, a determinare il risultato ...)



L'interferenza quantistica si osserva solo quando le due possibilità **coesistono**, ovvero se non è possibile sapere quale delle due si verifica.



[...] regardless of the quantum system, any information – recorded or not – about the alternative taken by a quantum process capable of following more than one alternative, destroys the **interference between alternatives**. (R. Feynman, A. R. Hibbs “*Quantum mechanics and path integrals*” )

L'interferenza di singoli oggetti quantistici si osserva quando questi hanno a disposizione **più cammini** per arrivare allo stesso rivelatore e nello stesso tempo **l'apparato sperimentale non permette di distinguere tra questi cammini.**

## In conclusione

- In un sistema a più cammini, il percorso di un elettrone/fotone singolo è **indefinito**, ed è descrivibile come **sovrapposizione** delle possibilità (*stati*). Questa sovrapposizione genera **interferenza**.
- Ciò che è **definito** con esattezza è la **probabilità** di osservare una delle possibilità in caso di misura.
- La misura “*which path?*” annulla la sovrapposizione di possibilità, scegliendo una unica *realtà* e cancellando così l’interferenza (**collasso**).
- La misura, anche se non perturba l’oggetto quantistico in senso usuale (es. esercitando una forza, ecc.), ha un ruolo attivo nel determinare il risultato che viene effettivamente osservato.

Questo “intreccio” tra oggetto quantistico e sistema di misura si può considerare un esempio di **entanglement**.



“But the atoms or the elementary particles are not real; they form a world of **potentialities** or **possibilities** rather than one of things and facts.” (W. Heisenberg)



E questo è molto strano. L'elettrone sembra essere un guazzabuglio di possibilità.



C'è qualcosa che non va? ...

... traiettorie (percorsi) e frange allo stesso tempo!!