

ΠΩΣ ΥΛΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΟΙ ΚΒΑΝΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ

Φωτονικά Κβαντικά Συστήματα

Είναι ένα από τα πολλά υποσχόμενο σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται για:

κβαντική αποθήκευση πληροφορίας, κβαντική επεξεργασία πληροφοριών,
καθώς επίσης και στις κβαντές τηλεπικοινωνίες

κάνει χρήση φωτός και συγκεκριμένα δέσμες φωτός μοναδικών φωτονίων (Single photons)

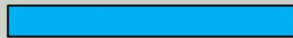
Η λειτουργία των βασίζονται στις βασικές κβαντικές ιδιότητες του φωτός:

της υπέρθεσης, της συμβολής και του κβαντικού εναγκαλισμού.

Διαχωριστής Δέσμης ή Ημιπερατό Κάτοπτρο

Ένα βασικό στοιχείο των οπτικών αυτών συστημάτων είναι ο διαχωριστής δέσμης Beam Splitter (BS) γνωστός και ως ημιπερατό κάτοπτρο (Semitransparent Mirror).

Αποτελείται από:



...ένα υπόστρωμα γυαλιού...

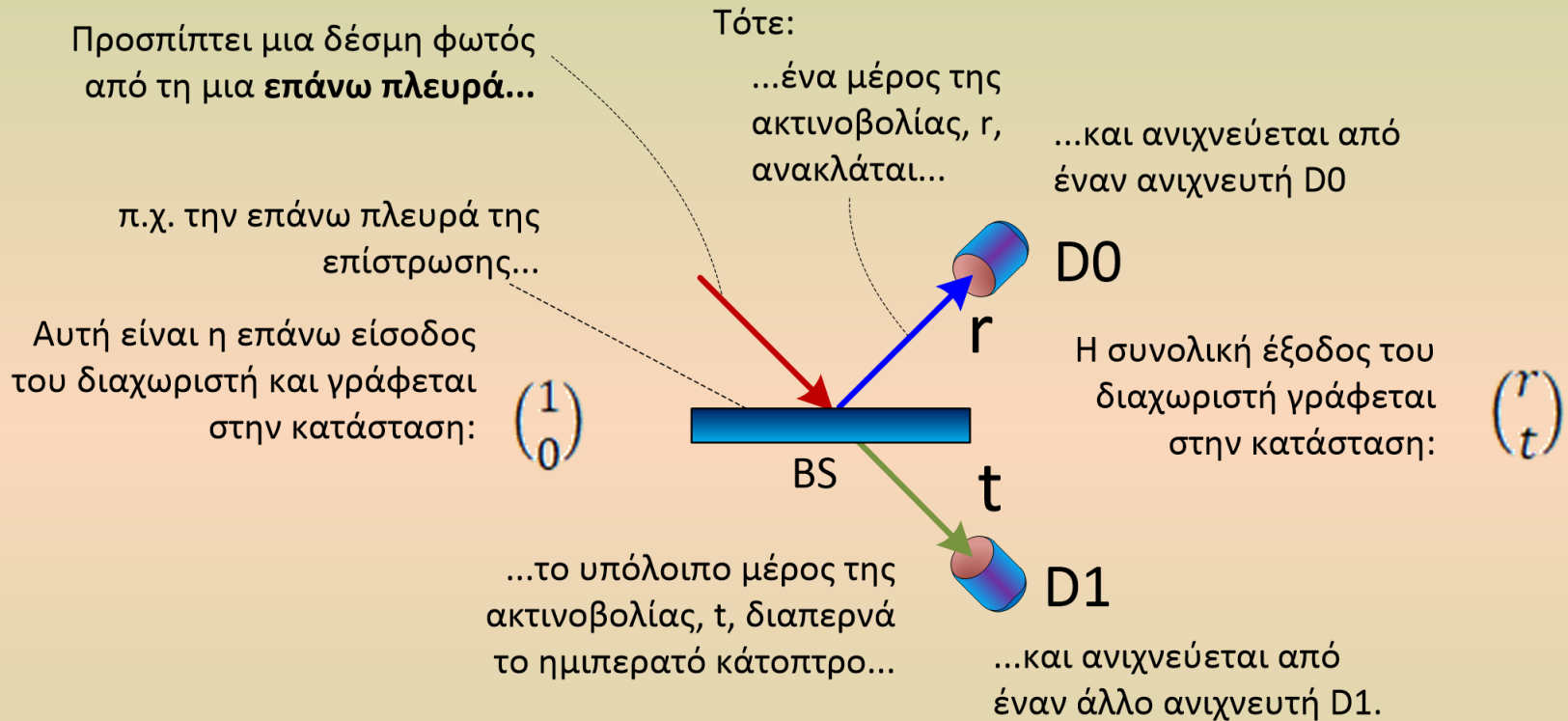
...επάνω στο οποίο έχει γίνει μια λεπτή υπόστρωση ενός...

...διηλεκτρικού υλικού...



BS

Ιδιότητες διαχωριστή δέσμης



Το γεγονός ότι:

...ένα μέρος της ακτινοβολίας, r , ανακλάται...

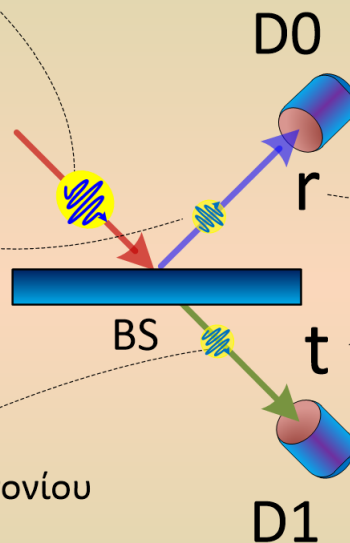
...και επειδή το φως συμπεριφέρεται σαν ηλεκτρομαγνητικό-κύμα, αλλά και σαν σωματίδιο-φωτόνια, δεν σημαίνει ότι κάθε φωτόνιο που προσπίπτει από τη **επάνω πλευρά**...

...διασπάται σε ένα μέρος του φωτονίου που ανακλάται...

...και ανιχνεύεται από τον ανιχνευτή D0...

...και στο υπόλοιπο μέρος του φωτονίου που διαπερνά τον διαχωριστή...

...και ανιχνεύεται από τον άλλο ανιχνευτή D1.



Όπου r θεωρείτε ως το πλάτος της ανάκλασης και...

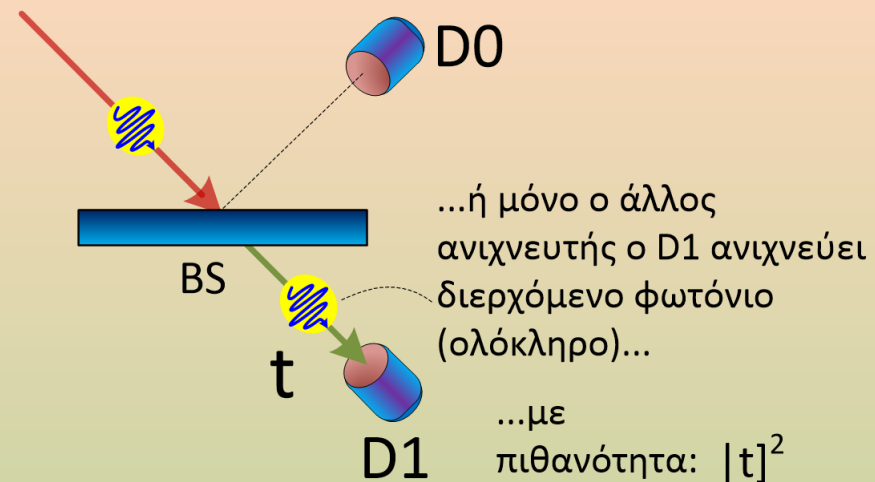
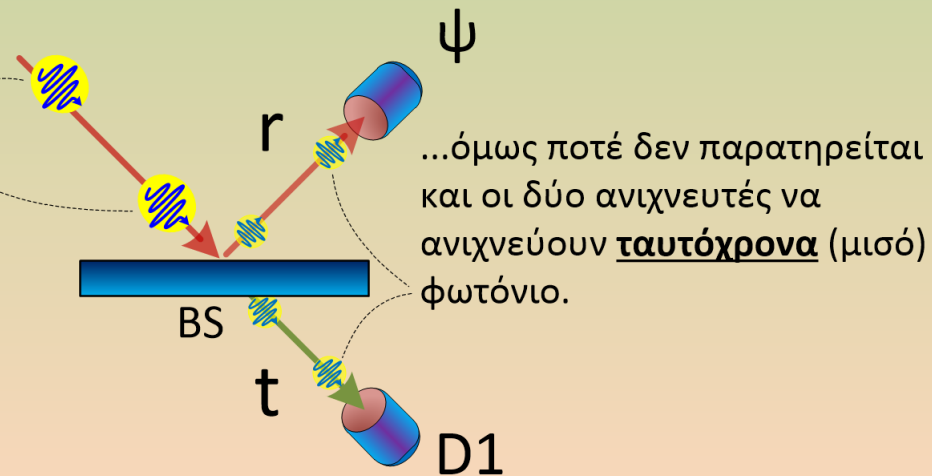
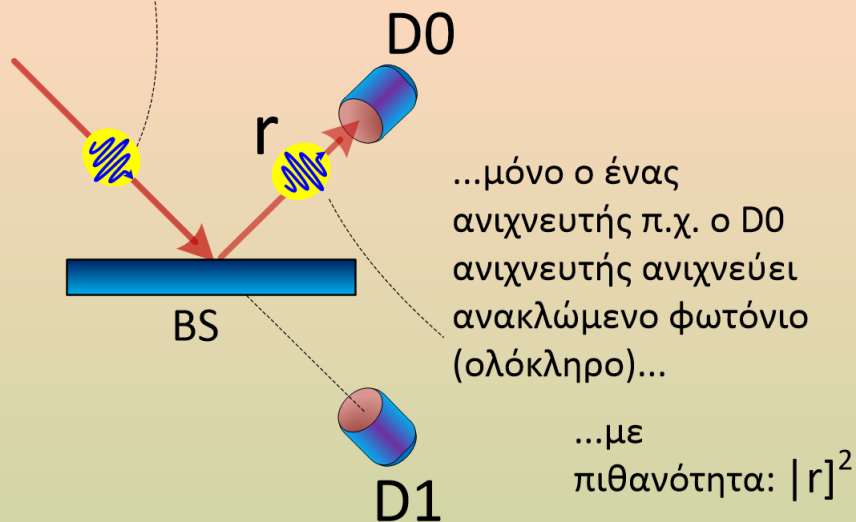
... t θεωρείτε ως ο συντελεστής της διερχόμενης ακτινοβολίας.

Τα φωτόνια είναι σωματίδια-οντότητες ενέργειας και για όσο ζουν παραμένουν ενιαία χωρίς να διαχωρίζονται.

Αυτό διαπιστώνεται πειραματικά ως εξής:

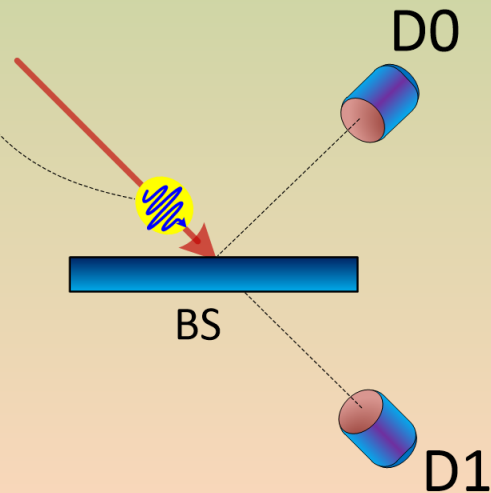
Η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μπορεί να ελαττωθεί έτσι ώστε να προσπίπτουν ένα-ένα φωτόνια κάθε φορά στο διαχωριστή στη **επάνω πλευρά...**

Αυτό που παρατηρείται είναι το εξής: κάθε φορά που προσπίπτει ένα φωτόνιο στο διαχωριστή κατόπιν, ...

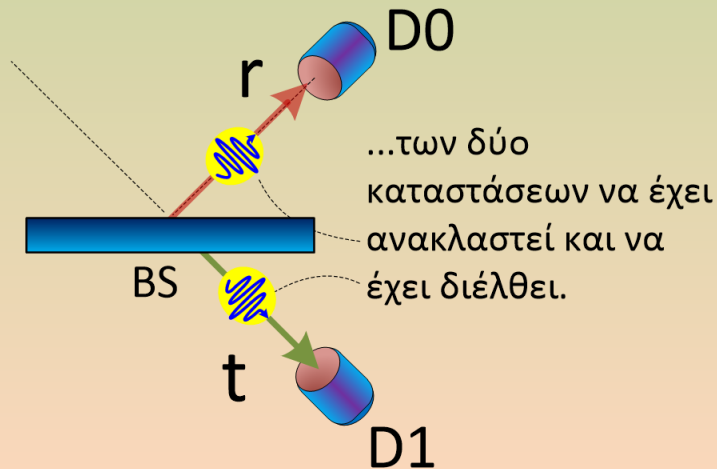


Τα παραπάνω σημαίνουν τα εξής:

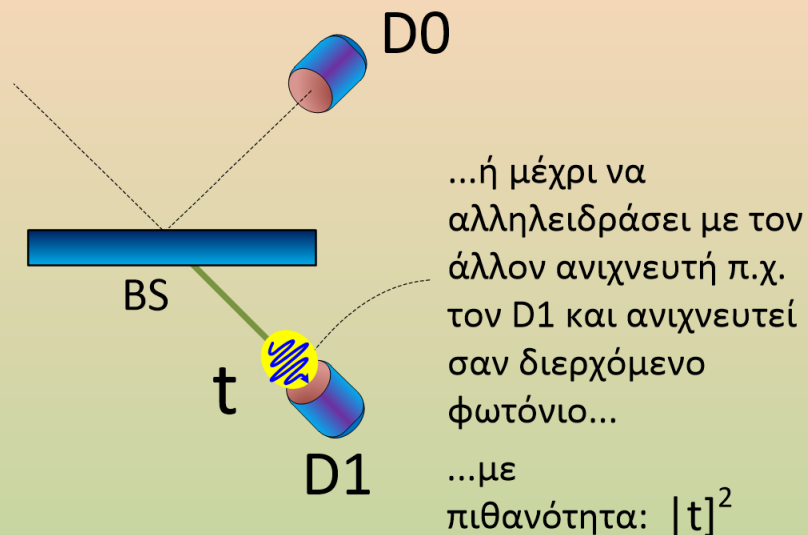
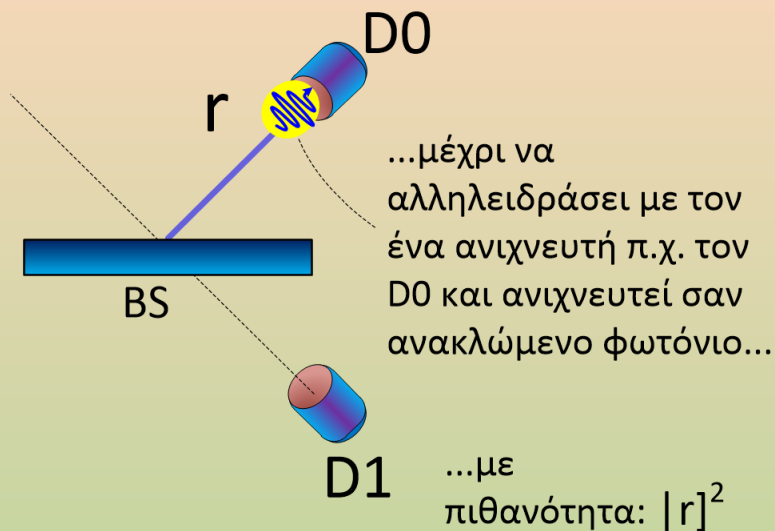
Κάθε φορά που ένα φωτόνιο προσπέσει στον διασκορπιστή...



...στη συνέχεια το φωτόνιο συνεχίζει να υπάρχει στις δύο εξόδους του διαχωριστή σε μια κατάσταση υπέρθεσης...



Το φωτόνιο παραμένει στην παραπάνω κατάσταση της υπέρθεσης...



Το κάθε ένα φωτόνιο στην είσοδο...

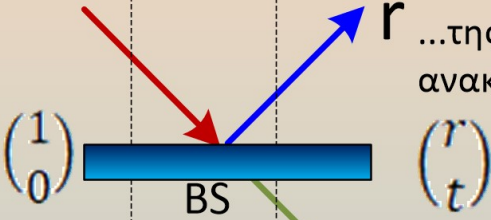
...του κατόπτρου που εισέρχεται από την **επάνω πλευρά**...

Στην έξοδο του διασκορπιστή...

...το φωτόνιο βρίσκεται στην κατάσταση της υπέρθεσης...

Άρα για το ανακλώμενο φωτόνιο βρίσκεται στην κατάσταση **επάνω** από το διαχωριστή και γράφεται: $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$

...αφού βρίσκεται στην κατάσταση επάνω από το διαχωριστή, τότε γράφεται: $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$



...της κατάστασης να ανακλαστεί προς τα επάνω, r , ...

$$\begin{pmatrix} r \\ t \end{pmatrix}$$

Άρα για το διερχόμενο φωτόνιο βρίσκεται στην κατάσταση **κάτω** από το διαχωριστή και γράφεται: $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

...και της κατάστασης να διαπεράσει προς τα κάτω, t .

Ένα φωτόνιο στην είσοδο γράφεται: $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} r \\ t \end{pmatrix}$

Στην έξοδο το φωτόνιο βρίσκεται σε υπέρθεση δύο καταστάσεων.

ΠΡΟΣΟΧΗ Να σημειώσουμε ότι αλλάξαμε λίγο το συμβολισμό των καταστάσεων με παρενθέσεις (), αντί για αγκύλες [] που είχαμε υιοθετήσει στην αρχή, όμως η σημασία τους παραμένει η ίδια.

Καθώς το φωτόνιο βρίσκεται στην παραπάνω κατάσταση της υπέρθεσης γράφεται:

$$\begin{pmatrix} r \\ t \end{pmatrix} = r \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

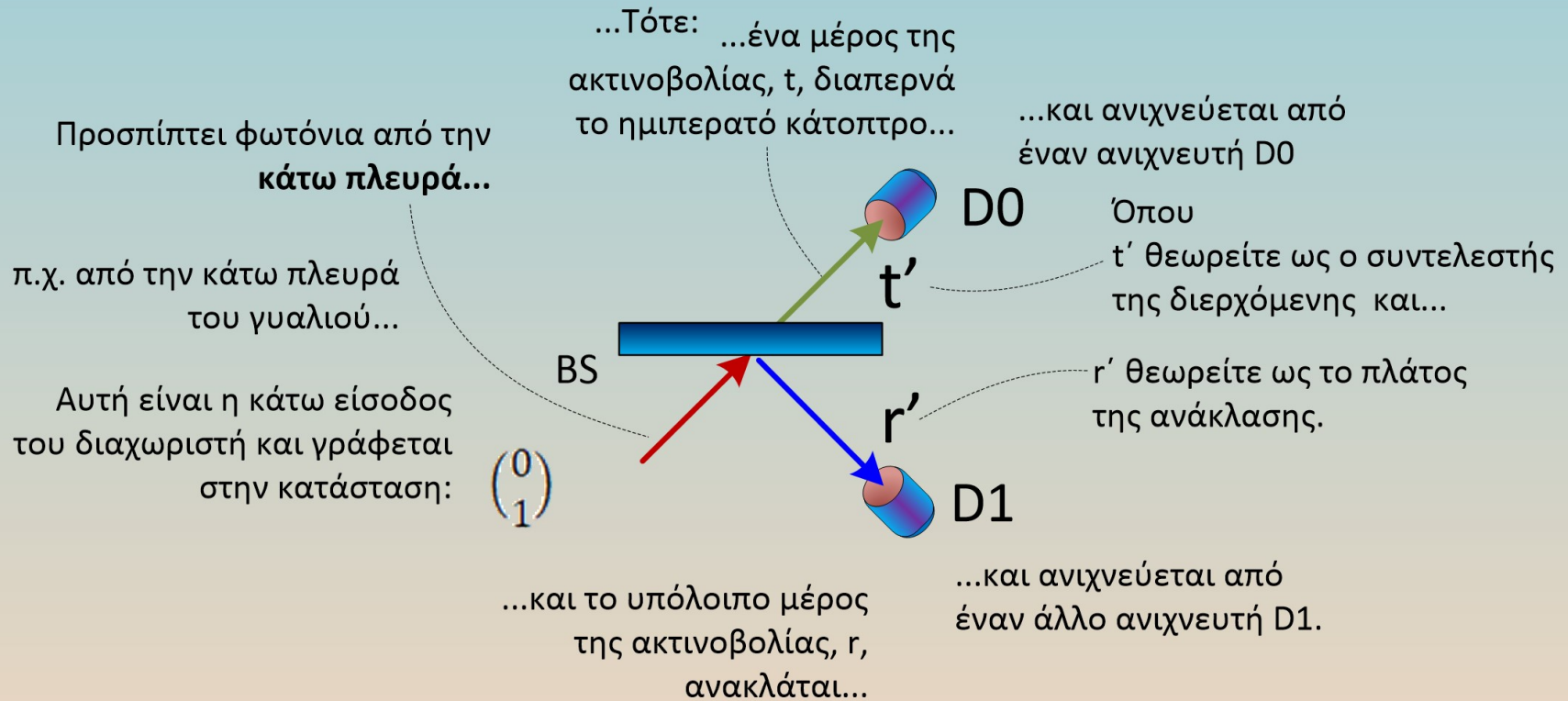
...του ανακλώμενου φωτόνιου επάνω από το διαχωριστή...

Με τις αντίστοιχες πιθανότητες να ικανοποιούν την συνθήκη:

...και του διερχόμενου φωτόνιου κάτω από το διαχωριστή.

$$|r|^2 + |t|^2 = 1$$

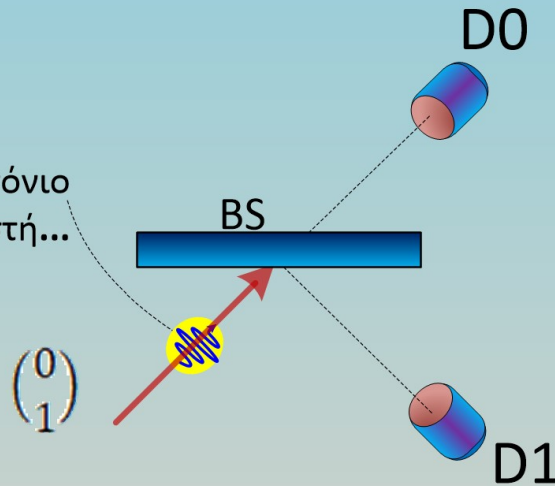
Ανάλογη συμπεριφορά παρατηρείται στην εναλλακτική περίπτωση που φωτόνια προσπίπτουν από τη περιοχή από κάτω από τον διαχωριστή.



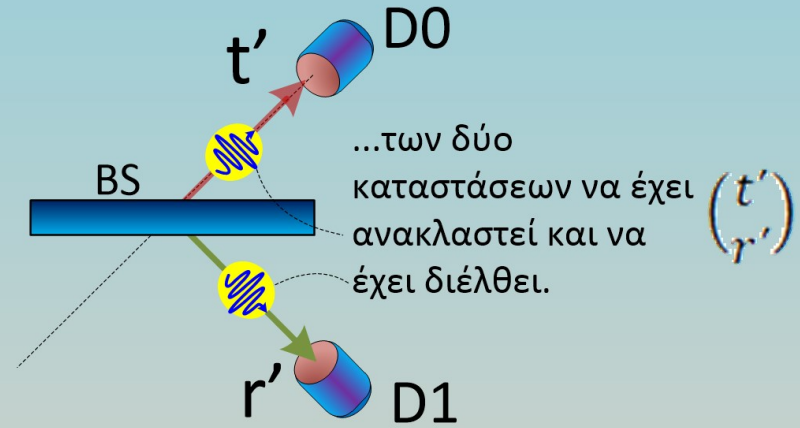
Ένα φωτόνιο στην είσοδο γράφεται: $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ \rightarrow Η συνολική έξοδος του διαχωριστή γράφεται στην κατάσταση: $\begin{pmatrix} t' \\ r' \end{pmatrix}$

Και σε αυτή την περίπτωση ισχύουν παρόμοια:

Κάθε φορά που ένα φωτόνιο προσπέσει στον διαχωριστή...



...στη συνέχεια το φωτόνιο συνεχίζει να υπάρχει στις δύο εξόδους του διαχωριστή σε μια κατάσταση υπέρθεσης...



$$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} t' \\ r' \end{pmatrix}$$

Στην είσοδο
ένα φωτόνιο

Στην έξοδο το φωτόνιο
βρίσκεται σε υπέρθεση δύο καταστάσεων.

Το φωτόνιο παραμένει στην κατάσταση της υπέρθεσης μέχρι να αλληλεπιδράσει με έναν από τους δύο ανιχνευτές.

...του ανακλώμενου φωτόνιου
κάτω από το διαχωριστή...

Καθώς το φωτόνιο βρίσκεται στην παραπάνω κατάσταση της υπέρθεσης γράφεται:

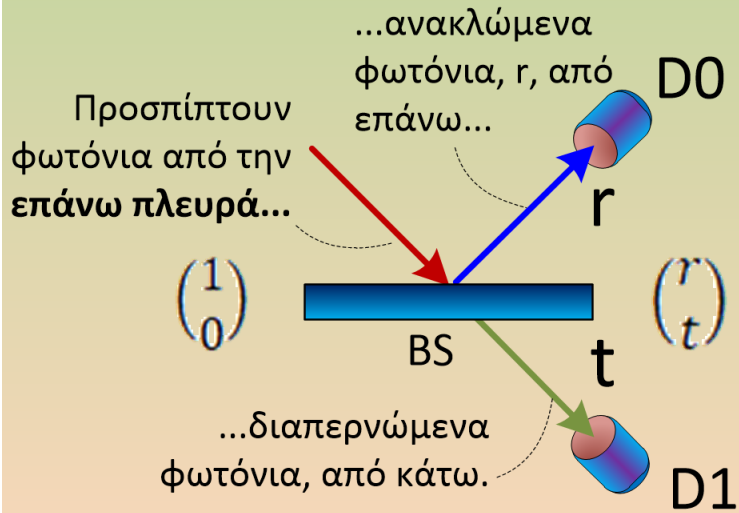
$$\begin{pmatrix} t' \\ r' \end{pmatrix} = r' \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + t' \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Με τις αντίστοιχες πιθανότητες να ικανοποιούν την συνθήκη:

$$|r'|^2 + |t'|^2 = 1$$

...και του διερχόμενου φωτόνιου επάνω από το διαχωριστή.

Ανακεφαλαιώνοντας



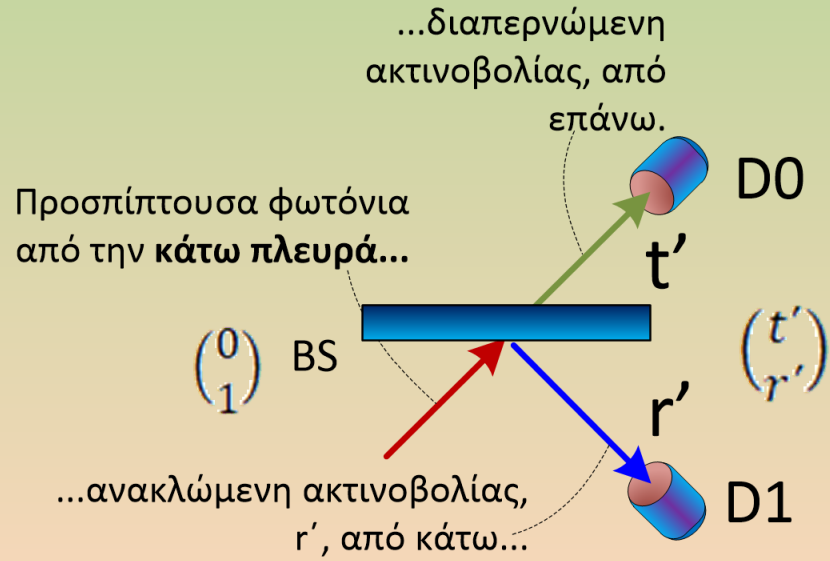
Η είσοδος... ...έδωσε έξοδο...

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} r \\ t \end{pmatrix}$$

...υπέρθεση των r , t .

$$\begin{pmatrix} r \\ t \end{pmatrix} = r \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$|r|^2 + |t|^2 = 1$$



Η είσοδος... ...έδωσε έξοδο...

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} t' \\ r' \end{pmatrix}$$

...υπέρθεση των r' και t' .

$$\begin{pmatrix} t' \\ r' \end{pmatrix} = r' \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + t' \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$|r'|^2 + |t'|^2 = 1$$

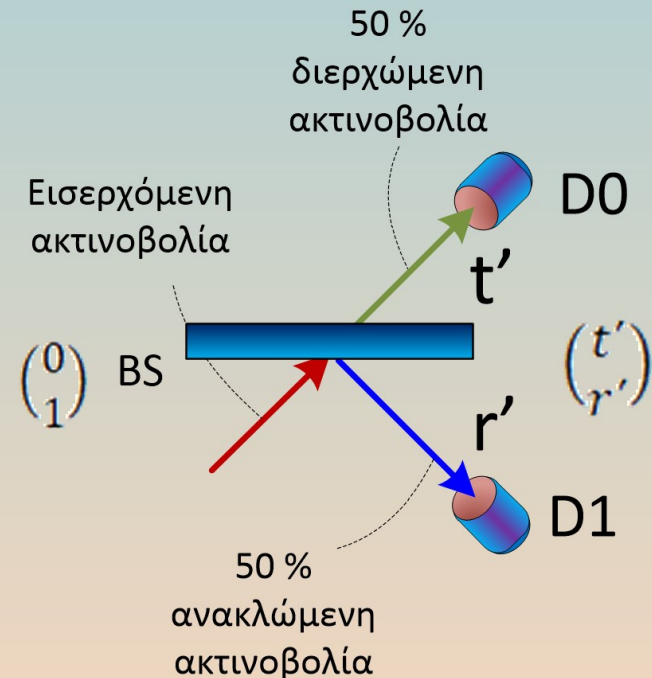
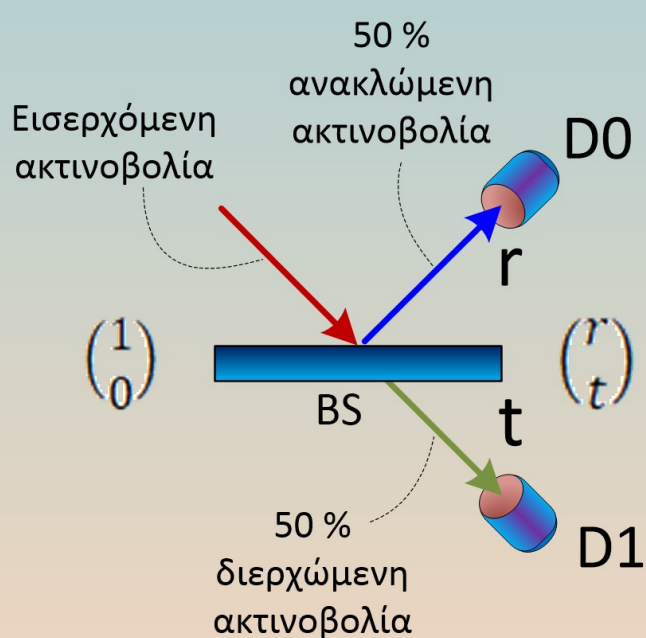
Παρατηρούμε ότι οι συντελεστές r , t , r' και t' γενικά δεν είναι ίδιοι και εξαρτώνται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του διαχωριστή.

Απόδειξη ότι τα φωτόνια στην έξοδο του διαχωριστή βρίσκονται σε κατάσταση υπέρθεσης υπάρχει από το ότι αυτά μπορεί να συμβάλουν όταν π.χ. θα περάσουν για δεύτερη φορά από ένα δεύτερο διαχωριστή δεσμών όπως θα δούμε παρακάτω.

Μια ειδική κατηγορία διαχωριστών δέσμης που χρησιμοποιούμε είναι οι λεγόμενοι ισοροπημένοι διασκορπιστές όπου οι συντελεστές r , t , r' και t' είναι ίδιοι σύμφωνα με:

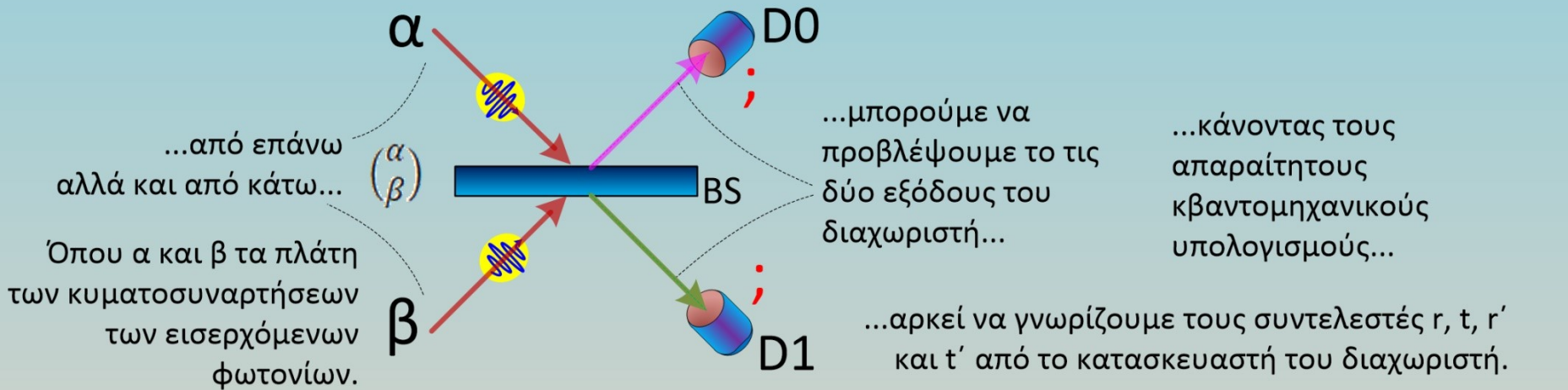
$$|r|^2 = |t|^2 = |r'|^2 = |t'|^2 = \frac{1}{2}$$

οι οποίοι εξασφαλίζουν ότι η ανακλώμενη και η διαπερνώμενη ακτινοβολία είναι ίσες 50/50 δημιουργώντας το ημιπερατό κάτοπτρο.



Πειράματα με διαχωριστές δέσμης

Στην γενική περίπτωση που υπάρχει προσπίπτων φωτόνιο και...



Είδαμε ότι:
 η είσοδος...
 $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} r \\ t \end{pmatrix}$...έδωσε έξοδο...

...και η είσοδος...
 $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} t' \\ r' \end{pmatrix}$...έδωσε έξοδο

...και η είσοδος...
 $\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

Αυτός ο πίνακας είναι η δράση του διαχωριστή δέσμης επάνω...

...στις κυματοσυναρτήσεις των δύο εισερχόμενων φωτονίων.

Τότε παίρνουμε:
 $\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} r \\ t \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} t' \\ r' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha r + \beta t' \\ \alpha t + \beta r' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r & t' \\ t & r' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$

Ο πίνακας του διαχωριστή δέσμης μπορεί να λάβει τις κατάλληλες τιμές, ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί που ορίζονται από τις πιθανότητες που πρέπει να κάνουν μονάδα.

Θα δοκιμάσουμε έναν άλλο πίνακα του διαχωριστή δέσμης

...τότε ο πίνακας του διαχωριστή δέσμης γίνεται:

Θεωρούμε ισοροπημένο διασχωριστή όπου οι συντελεστές r , t , r' και t' είναι ίσοι σύμφωνα με:

$$|r|^2 = |t|^2 = |r'|^2 = |t'|^2 = \frac{1}{2}$$

$$\begin{pmatrix} r & t' \\ t & r' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

...οι οποίοι είπαμε προηγουμένως ότι εξασφαλίζουν ότι η ανακλώμενη και η διαπερνώμενη ακτινοβολία είναι ίσες 50%/50% δηλαδή είναι ημιπερατό κάτοπτρο.

Αυτός ο πίνακας δρά επάνω...

...στις κυματοσυναρτήσεις μιας εισερχόμενης κανονικοποιημένης ακτινοβολίας.

$$\begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} = 1/2 + 1/2 = 1$$

Η ολική πιθανότητα είναι μονάδα.

Επομένως διατηρείται ο αριθμός των φωτονίων στη έξοδο του διαχωριστή και έτσι μπορεί να είναι ρεαλιστικός ο διαχωριστής δέσμης.

Όμως αν ο πίνακας δράσει επάνω...

...στις κυματοσυναρτήσεις των δύο εισερχόμενων κανονικοποιημένων ακτινοβολιών α , β .

$$\begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = 1 + 1 = 2$$

Η ολική πιθανότητα ξεπερνά την μονάδα.

Δεν διατηρείται ο αριθμός των φωτονίων στη έξοδο του διαχωριστή και έτσι δεν είναι ρεαλιστικός αυτός ο διαχωριστής δέσμης.

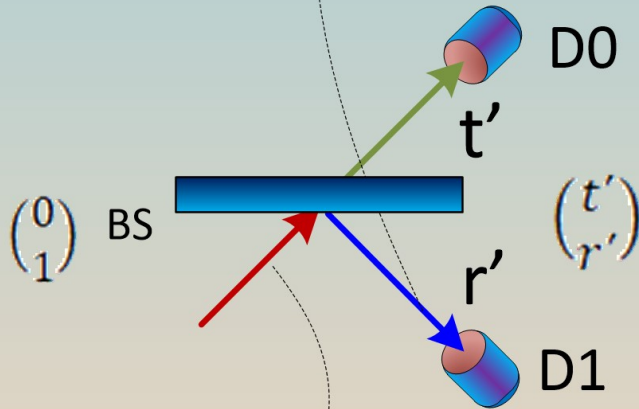
Θα τροποποιήσουμε λίγο τον πίνακα του διαχωριστή δέσμης...

...θέτοντας **-1** εδώ.

$$\begin{pmatrix} r & t' \\ t & r' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

Το -1 αντιστοιχεί στην ανακλώμενη ακτινοβολία r' ...

Το -1 στην r' φανερώνει ότι η ανακλώμενη άλλαξε σημείο (αντιστρέφεται) που ισοδυναμεί με μια μετατόπιση φάσης π .



Αυτό επιτυγχάνεται από το κατασκευαστή του διαχωριστή δέσμης,...

...επιστρώνοντας ένα λεπτό στρώμα διηλεκτρικού...

...από την ακτινοβολία που εισέρχεται από κάτω στον διαχωριστή.

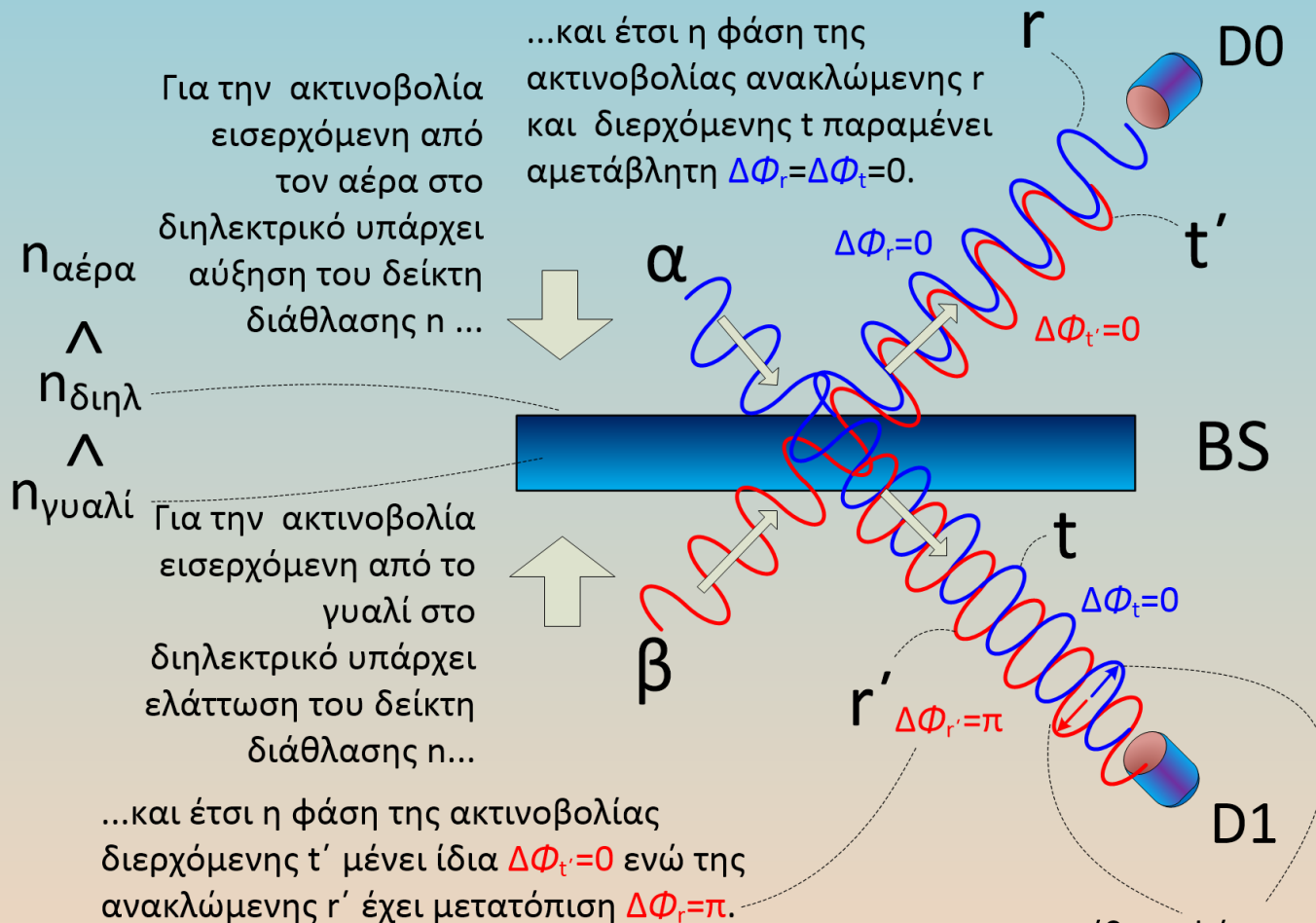
...στην επιφάνεια του γυαλιού.

...με δείκτη διάθλασης διηλεκτρικού $n_{\text{διηλεκτρικού}}$ τέτοιο ώστε:

$$n_{\text{αέρα}} < n_{\text{διηλεκτρικού}} < n_{\text{γυαλιού}}$$

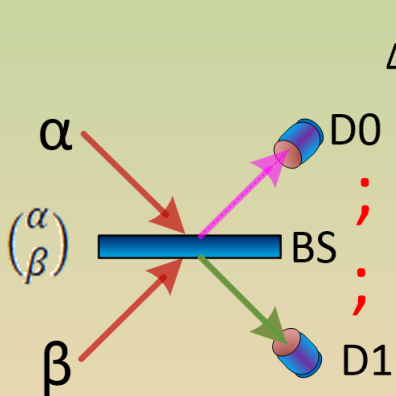
Να δούμε τι συμβαίνει με τις ακτινοβολίες α, β που εισέρχονται στον διαχωριστή αυτόν που έχει κατασκευαστεί με του δείκτες διάθλασης:

$$n_{\text{αέρα}} < n_{\text{διηλεκτρικού}} < n_{\text{γυαλιού}}$$



Επομένως οι ακτινοβολίες προς τον ανιχνευτή D1 έχουν....

αντίθετη φάση και θα συμβάλουν αναιρετικά και έτσι το σήμα στον D1 μπορεί να είναι μηδενικό.



Δρώντας ο πίνακας του διαχωριστή δέσμης...

...στις κυματοσυνρτήσεις των δύο εισερχόμενα φωτονίων α, β

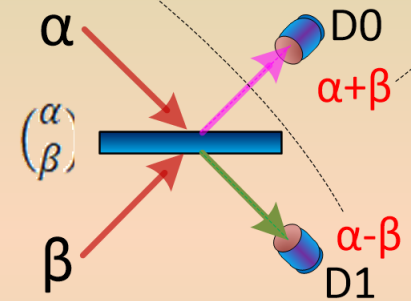
Παίρνουμε αποτέλεσμα...

$$\begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \alpha + \beta \\ \alpha - \beta \end{pmatrix} = \frac{1}{2} ([\alpha + \beta]^2 + [\alpha - \beta]^2)$$

... $\alpha + \beta$ για την επάνω δέσμη...

...και $\alpha - \beta$ για την κάτω δέσμη.

Αν είναι $|\alpha| = |\beta|$... τότε η εξερχόμενη ακτινοβολία από κάτω είναι: $\alpha - \beta = 0$ μηδενική, λόγω ότι εκεί (ανιχνευτής D1) είδαμε ότι γίνεται αναιρετική συμβολή.



Επιπλέον παίρνουμε:

Επειδή οι κυματοσυναρτήσεις των φωτονίων α, β είναι κανονικοποιημένες ισχύει:

$$= \frac{1}{2} ((\alpha + \beta)(\alpha^* + \beta^*) + (\alpha - \beta)(\alpha^* - \beta^*)) = [\alpha]^2 + [\beta]^2 = 1/2 + 1/2 = 1$$

Έτσι παραπάνω πίνακας είναι ένας καλός πίνακας...

Η ολική πιθανότητα είναι μονάδα και διατηρείται ο αριθμός των φωτονίων στη έξοδο του διαχωριστή.

$$\begin{pmatrix} r & t' \\ t & r' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

...και έτσι περιγράφει ένα ρεαλιστικό διαχωριστή δέσμης που μπορεί να υπάρξει στη πραγματικότητα.

Παρόμοια μορούν να εξετασύν και άλλοι πίνακας αν είναι καλοί πίνακες, όπως π.χ. ο πίνακας...

$$\begin{pmatrix} r & t' \\ t & r' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

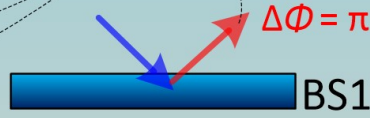
Πειράματα με δύο διαχωριστές δέσμης

Θα δοκιμάσουμε πειραματικά το συνδιασμό από δύο διαχωριστές ακτινοβολίας BS1 και BS2, δύο κάτοπτρα M1 και M2 και από δύο ανιχνευτές D0 και D1, όπως στην παρακάτω οπτική διάταξη, η οποία λειτουργεί ως συμβολόμετρο γνωστό ως **Mach Zender Interferometer (ZDI)** όπου πραγματοποιείται συμβολή του φωτός.

Ο πίνακας του διαχωριστή δέσμης BS1 είναι: $\begin{pmatrix} r & t' \\ t & r' \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$

δηλαδή δημιουργεί $\Delta\Phi = \pi$ στην ανακλώμενη r επάνω

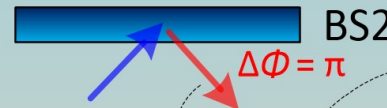
$$\begin{pmatrix} r & t' \\ t & r' \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$



Ο πίνακας του διαχωριστή δέσμης BS2 είναι: $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r & t' \\ t & r' \end{pmatrix}$

...δηλαδή δημιουργεί $\Delta\Phi = \pi$... στην ανακλώμενη r' κάτω.

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r & t' \\ t & r' \end{pmatrix}$$



Τα κάτοπτρα M1 και M2 θεωρούμε πως απλά ανακλούν τις δέσμες χωρίς να τις επηρεάζουν.

Εισερχόμενα φωτόνια...

$$\alpha \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

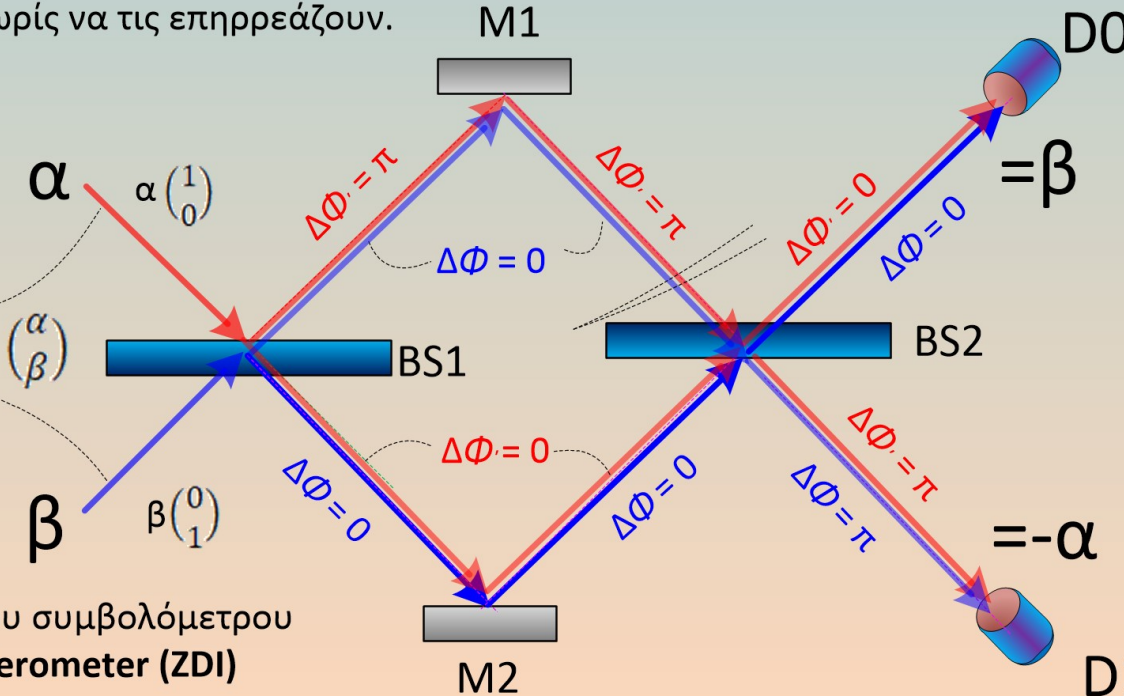
...από επάνω...

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

και από κάτω...

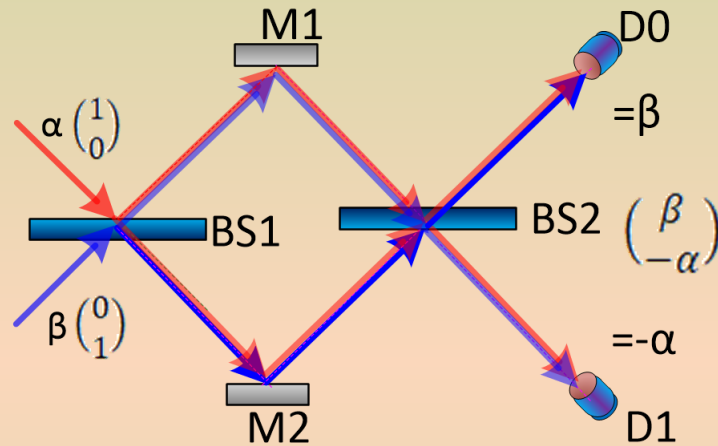
$$\beta \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Η οπτική διάταξη του συμβολόμετρου **Mach Zender Interferometer (ZDI)**



Επομένως τα κύματα και προς τους δύο ανιχνευτές D1 δεν έχουν αντίθετη φάση και δεν συμβάλουν αναιρετικά.

Ας υπολογίσουμε κβαντομηχανικά τα αποτελέσματα για αυτό το συμβολόμετρο στη γενική περίπτωση με δύο εισερχόμενες κυματοσυναρτήσεις α , β από επάνω και κάτω:



Δρώντας διαδοχικά οι δύο πίνακες των δύο διαχωριστών δέσμης BS1 και BS2...

στα δύο εισερχόμενα φωτόνια α , β

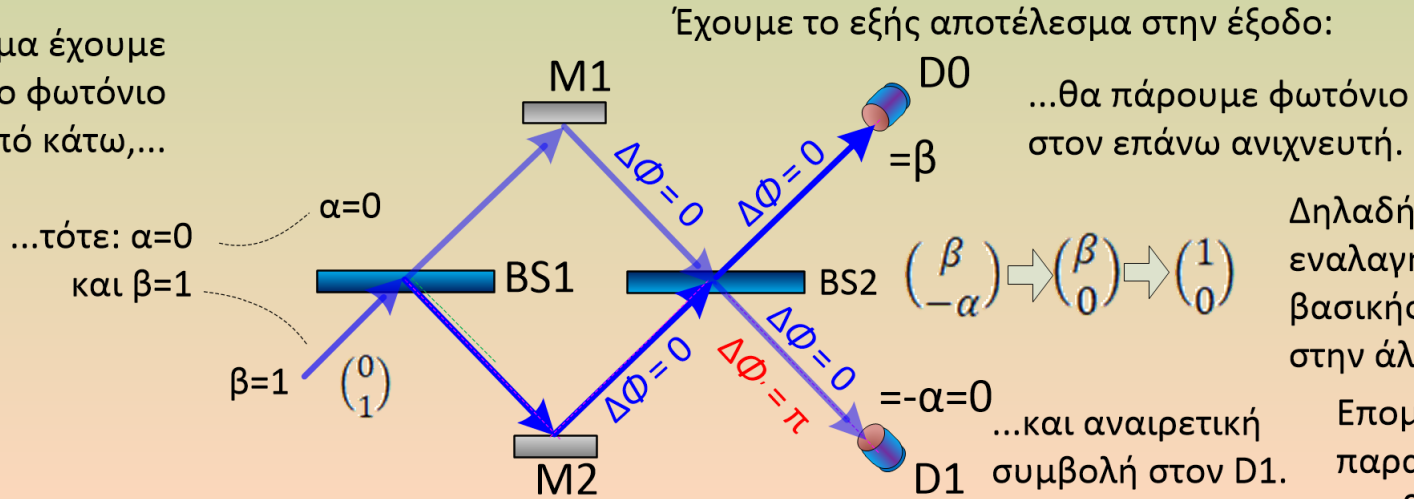
...παίρνουμε αποτέλεσμα...

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ -2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta \\ -\alpha \end{pmatrix}$$

... β για την επάνω δέσμη...
...και $-\alpha$ για την κάτω δέσμη.

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το παραπάνω αποτέλεσμα σε άλλες ειδικές υποπεριπτώσεις, θέτοντας κάθε φορά τις αντίστοιχες τιμές για τα α και β στην είσοδο και στην έξοδο του συμβολομέτρου.

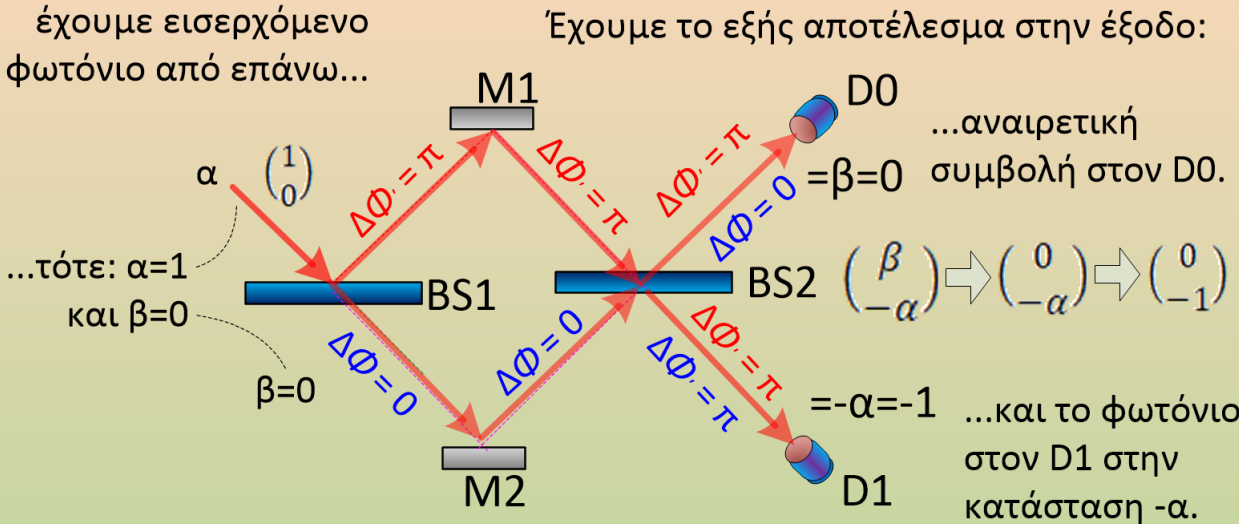
Για παράδειγμα έχουμε εισερχόμενο φωτόνιο μόνο από κάτω,...



Δηλαδή κάνει εναλλαγή της μιας βασικής κατάστασης στην άλλη.

Επομένως το παραπάνω συμβολόμετρο λειτουργεί ως **πύλη NOT**.

Στο άλλο παράδειγμα έχουμε εισερχόμενο φωτόνιο από επάνω...



Το γεγονός ότι τα φωτόνια στην έξοδο του συμβολομέτρου ZDI υφίστανται ενισχυτική ή αναιρετική συμβολή, επιβεβαιώνει πως το κάθε φωτόνιο μετά την είσοδό του βρίσκεται σε δύο καταστάσεις υπέρθεσης.

Δημιουργία της πύλης Hadamard σε συμβολόμετρο με δύο διαχωριστές δέσμης

Θα παράγουμε τη λειτουργία της πύλης Hadamard με τη βοήθεια του MZI συμβολόμετρο με κατάλληλο προσανατολισμό των δύο διαχωριστών δέσμης.

Ο πίνακας δράσης της πύλης Hadamard είναι ο εξής:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

Όταν η πύλη δράσει σε...
...ένα Qubit που βρίσκεται σε μια βασική κατάσταση,...

...τότε μεταφέρει το Qubit σε κατάσταση υπέρθεσης των δύο βασικών του καταστάσεων:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} = 1/\sqrt{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + 1/\sqrt{2} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Όταν η πύλη ξαναδράσει...
...στη κατάσταση της υπέρθεσης,...

...τότε επαναφέρει το Qubit στην αρχική του βασική κατάσταση :

Η πύλη Hadamard είναι πολύ σημαντική για τους κβαντικούς υπολογιστές, γιατί θέτει τα Qubit σε υπέρθεση και...

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

...κατόπιν μπορεί να ανασύρει την κρυμμένη πληροφορία και να επαναφέρει την αρχική βασική κατάσταση.

Αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί εμείς μόνο βασικές καταστάσεις μπορούμε να αντιληφθούμε.

Παρατηρούμε ότι ο πίνακας δράσης της πύλης Hadamard... $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$

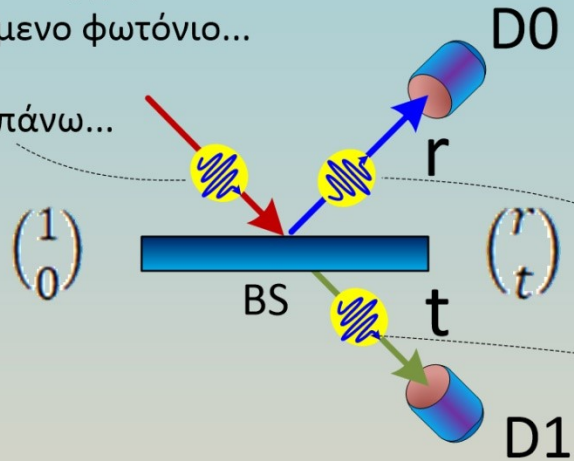
...είναι ίδιος με αυτόν του διαχωριστή δέσμης που είδαμε πριν

$$\begin{pmatrix} r \\ t \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

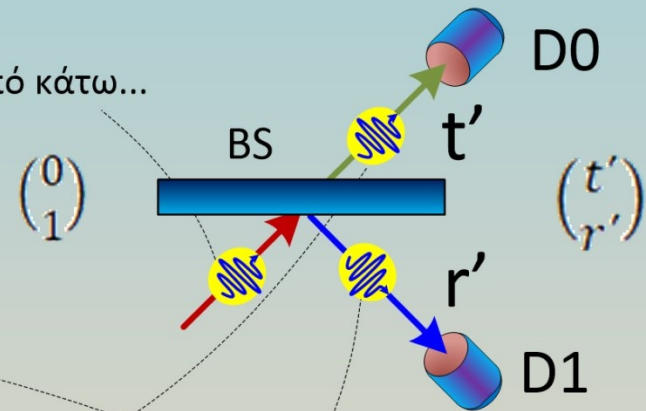
Αυτός ο διαχωριστής δέσμης είδαμε ότι λειτουργεί ως εξής:

Κάθε εισερχόμενο εισερχόμενο φωτόνιο...

...από επάνω...



...ή από κάτω...



..τίθεται σε κατάσταση υπέρθεσης φωτόνιο επάνω και φωτόνιο κάτω από τον διαχωριστή.

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} + 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} + 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 + \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 - \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} - \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Ακόμα μια απόδειξη ότι τα φωτόνια στην έξοδο του διαχωριστή βρίσκονται σε κατάσταση υπέρθεσης είναι ότι αυτά μπορεί να συμβάλουν όταν θα περάσουν για δεύτερη φορά από ένα δεύτερο διαχωριστή δεσμών όπως θα δούμε παρακάτω.

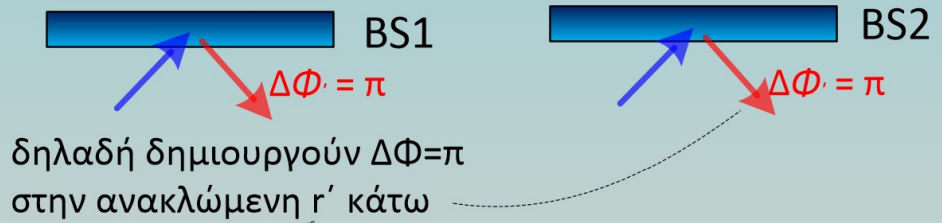
Θα παράγουμε τη λειτουργία της δράσης της πύλης Hadamard δύο φορές στην διάταξη του συμβολόμετρου MZI με κατάλληλο προσανατολισμό των δύο διαχωριστών δέσμης.

Σε αυτό το συμβολόμετρο ένα εισερχόμενο φωτόνιο πρώτα τίθεται σε κατάσταση υπέρθεσης και κατόπιν επαναφέρεται στην αρχική κατάσταση που εισήλθε στο συμβολόμετρο.

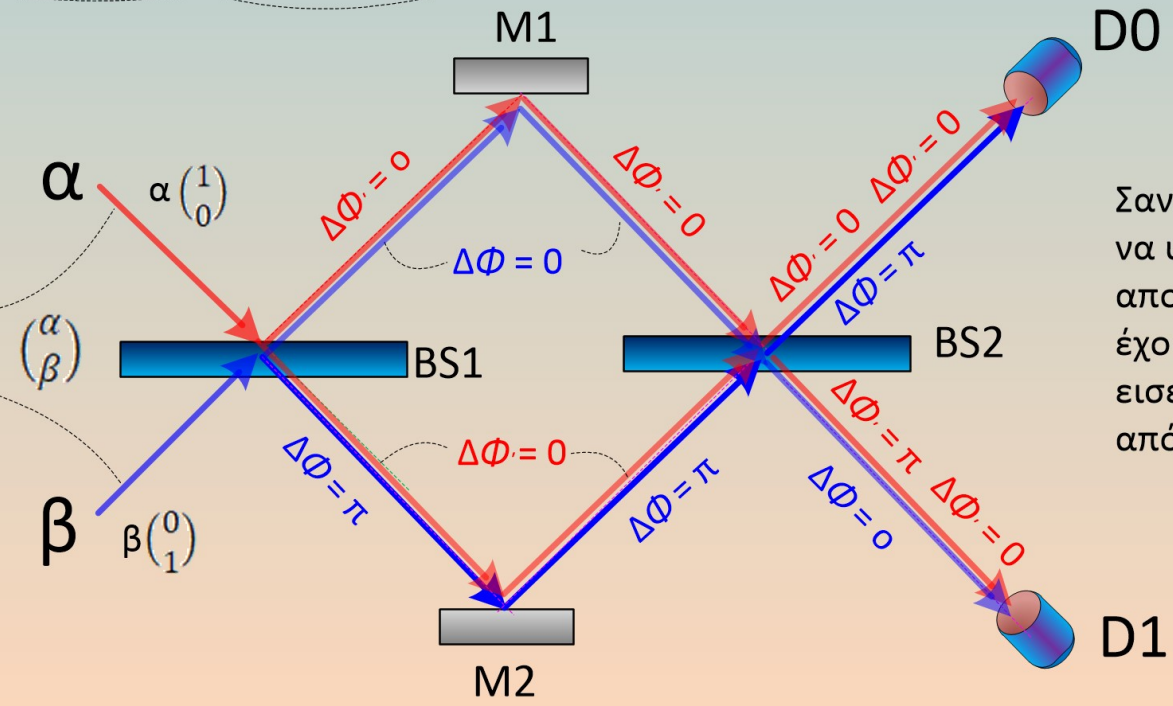
Έτσι αυτό δρα όπως ακριβώς η πύλη Hadamard δύο φορές.

Εδώ οι πίνακες των διαχωριστών δέσμης BS1 και BS2 είναι ίδιοι:

$$\begin{pmatrix} r & t' \\ t & r' \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$



Εισερχόμενες ακτινοβολίες...
...από επάνω...
και από κάτω...

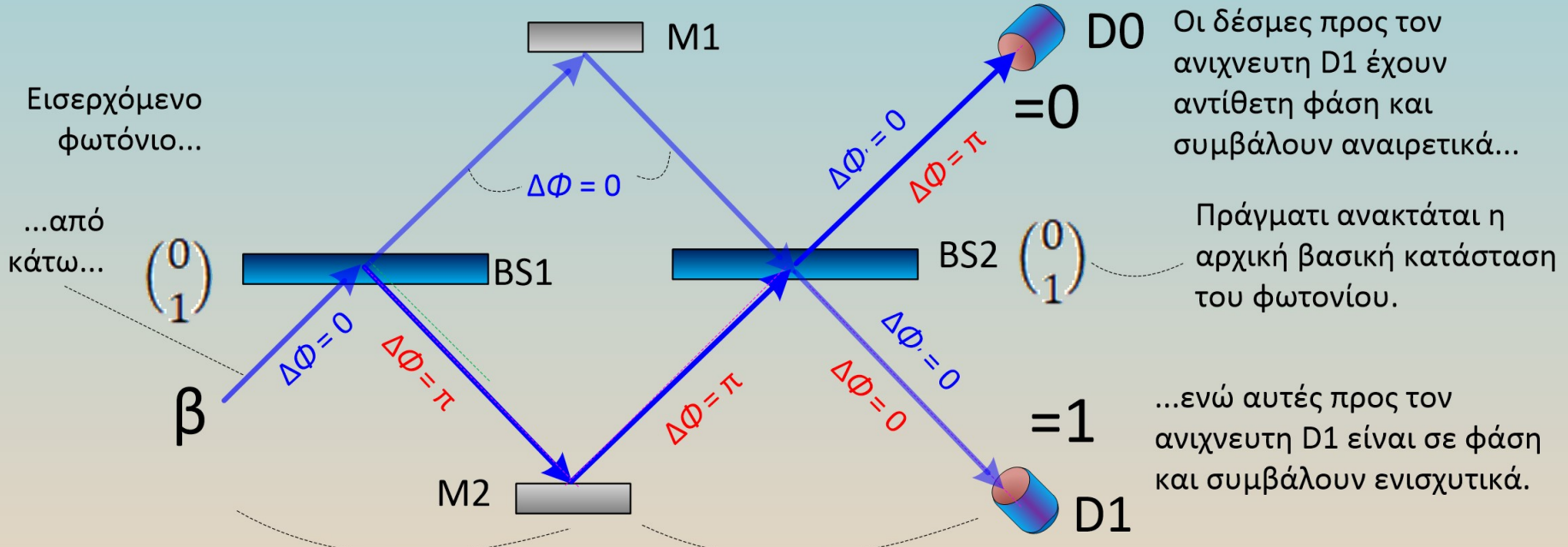


Σαν άσκηση μπορεί να υπολογιστεί το αποτέλεσμα όταν έχουμε δύο εισερχόμενα φωτόνια από επάνω και κάτω.

Το παραπάνω συμβολόμετρο μπορεί να παράγει τη δράση δύο φορές της πύλης Hadamard σε ένα φωτόνιο στη βασική κατάσταση που εισέρχεται στο συμβολόμετρο από κάτω ή από επάνω.

Θα εξετάσουμε την λειτουργία του συμβολομέτρου όταν εισέρχεται φωτόνιο στο συμβολόμετρο από κάτω και είναι στη βασική κατάσταση: $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

Το αποτέλεσμα του συμβολομέτρου στην έξοδο θα πρέπει να είναι φωτόνιο στη αρχική βασική κατάσταση κάτω: $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$



Δράση πρώτη φορά της πύλης Hadamard στο εισερχόμενο Φωτόνιο...

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} + 0 \\ 0 - \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

...δράση δεύτερη φορά της πύλης Hadamard στην κατάσταση υπέρθεσης του φωτονίου...

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} \\ -1/\sqrt{2} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

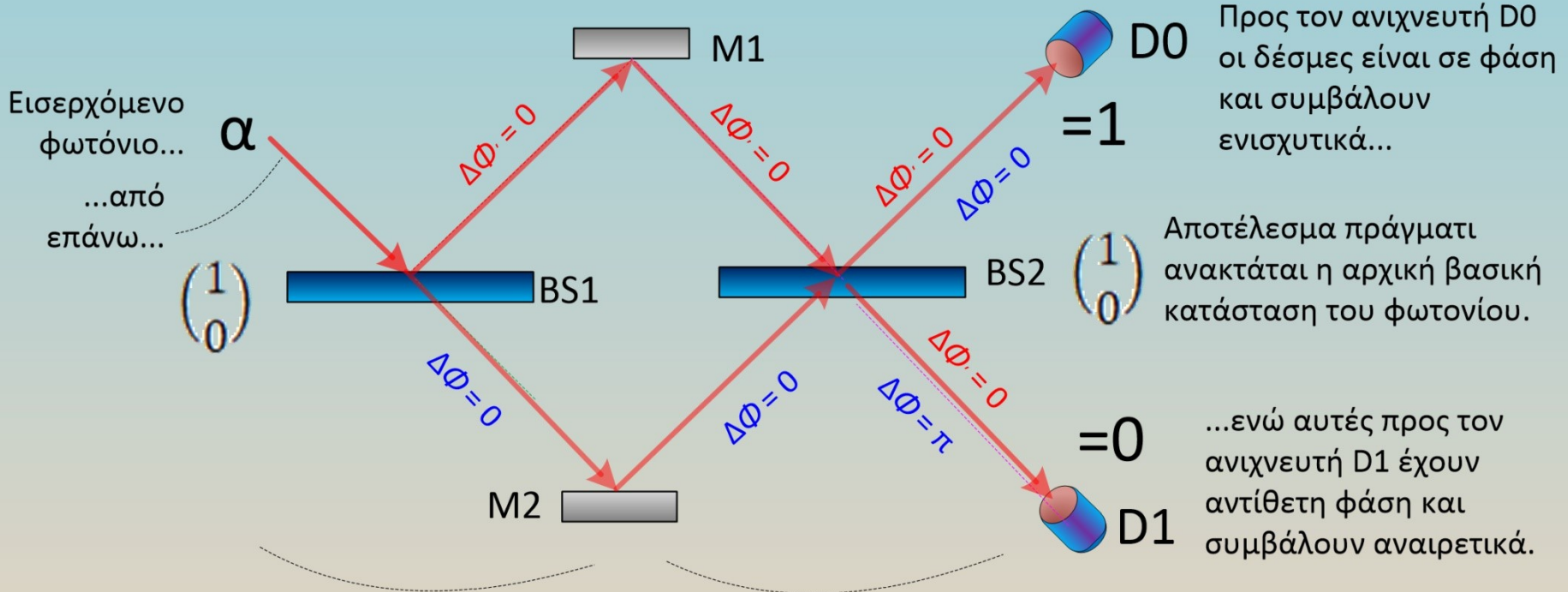
..ανακτάται η αρχική βασική κατάσταση του φωτονίου.

Παρόμοια ισχύουν και στη λειτουργία του συμβολομέτρου όταν εισέρχεται φωτόνιο στο συμβολόμετρο από επάνω και είναι στη βασική κατάσταση:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Το αποτέλεσμα του συμβολομέτρου στην έξοδο θα πρέπει να είναι φωτόνιο στη αρχική βασική κατάσταση επάνω:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$



Δράση πρώτη φορά της πύλης Hadamard στο εισερχόμενο Φωτόνιο...

...δράση δεύτερη φορά της πύλης Hadamard στην κατάσταση υπέρθεσης του Φωτονίου...

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} + 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} + 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

...Ανακτάται η αρχική βασική κατάσταση του φωτονίου.

Chips Φωτονικής τεχνολογίας

Η φωτονική τεχνολογία έχει αναπτυχθεί ραγδαία και οπτικά συστήματα που αναπτύχθηκαν για κβαντικούς υπολογισμούς και κβαντικές τηλεπικοινωνίες σε μεγάλα οπτικά τραπέζια έχουν τώρα συμκρινθεί απίστευτα επάνω σε Chip της υπάρχουσας τεχνολογίας πυριτίου ξεπερνώντας αυτό το πρόβλημα του όγκου.

Η πηγή laser είναι InP συμκρίνθηκε περίπου 1000 φορές και ενσωματώθηκε στο Chip.

Μπορούν να δημιουργούν 8000 ζεύγη φωτονίων σε διεμπλοκή χωρίς τη χρήση ογκωδών διαχωριστών δέσμης.

Όλα αυτά η πηγή του φωτό Laser τα φίλτρα τα κάτοπτρα οι διαχωριστές δέσμης δημιουργήθηκαν σε ένα Chip $1 \times 1 \text{ cm}^2$!!! λύνοντας το πρόβλημα της ενσωμάτωσης σε ένα μικρό κύκλωμα Chip.

Οι φωτονικοί κβαντικοί υπολογιστές έχουν πολλά πλεονεκτήματα.

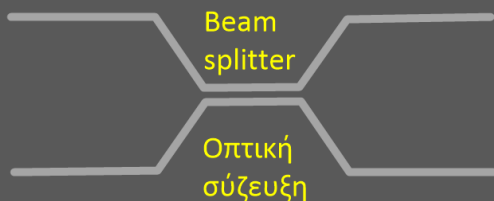
Χρησιμοποιούν φωτόνια τα οποία παρουσιάζουν ανοχή και δεν αλληλεπιδρούν εύκολα με το περιβάλλον

Γιαυτό γιατί μπορούν να λειτουργούν σε θερμοκρασία του περιβάλλοντος και δεν χρειάζονται ψύξη.

Αυτό με τη σειρά του κάνει τους φωτονικούς κβαντικούς υπολογιστές πολύ πιο εύκολους στη κατασκευή σε μικρές διατάξεις και μπορεί να γίνουν φορητοί.

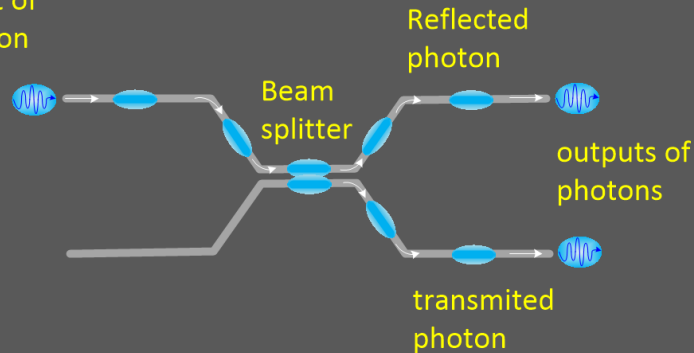
Φωτόνια μεταφέρονται μέσα από κυματοδηγούς (waveguides) επάνω σε Chip πυριτίου δημιουργώντας διαχωριστές δέσμης (Beam splitters), Οπτικοί συντονιστές δακτυλίου (optical ring resonators) σχηματίζοντας τις βασικές κβαντικές πύλες για του κβαντικούς υπολογισμούς.

Two Waveguides on a chip

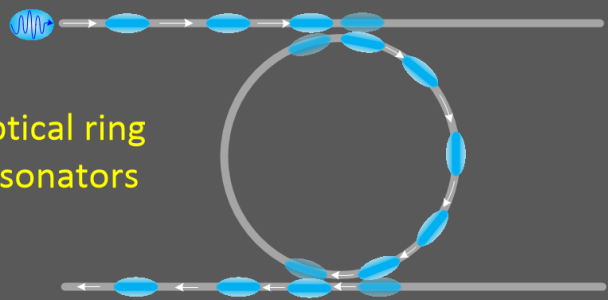


Σε λειτουργία διαχωριστή δέσμης (Beam splitter)

Input of photon



optical ring resonators



Σε λειτουργία ανακλαστήρα

Είσοδος 1

optical combiner
Οπτικός
συνδιαστής

Πύλη AND

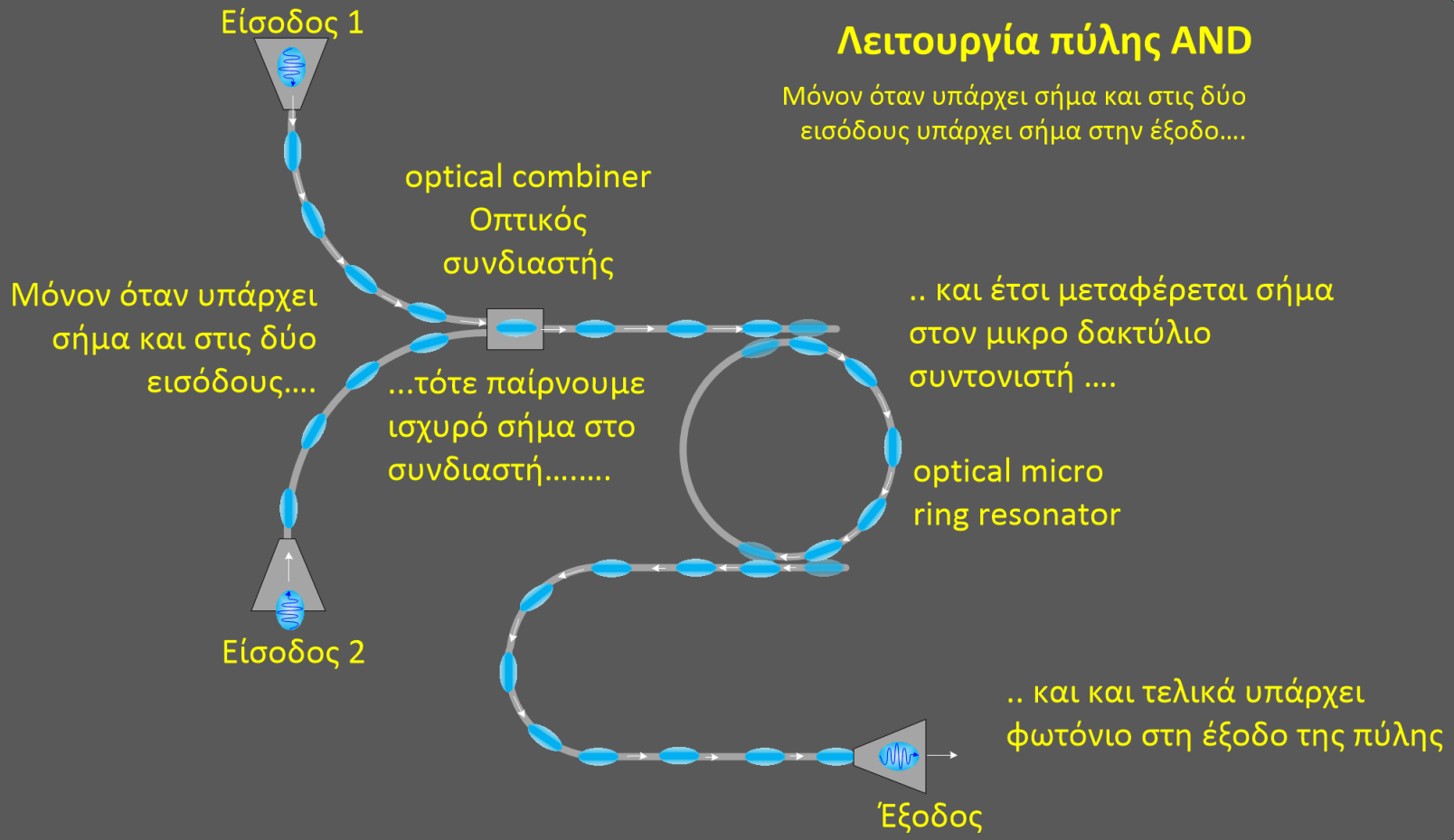
Είσοδος 2

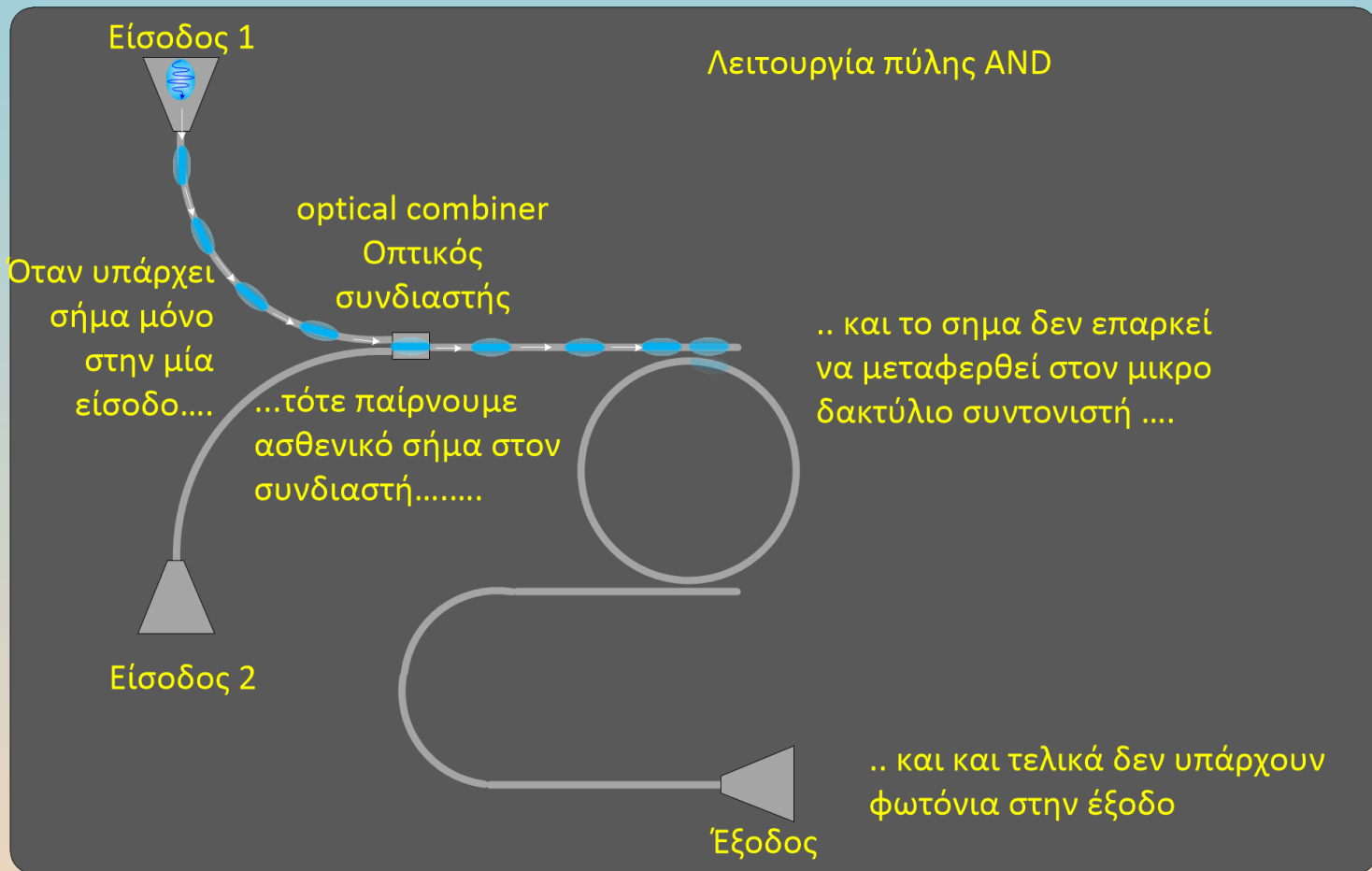
optical micro ring resonator

Έξοδος

Λειτουργία πύλης AND

Μόνον όταν υπάρχει σήμα και στις δύο εισόδους υπάρχει σήμα στην έξοδο....





Σύμφωνα με τα κριτήρια του DiVincenzo, η κατασκευή ενός κβαντικού υπολογιστή απαιτεί η πειραματική διάταξη να πληροί πέντε προϋποθέσεις:

1. Ένα κλιμακούμενο φυσικό σύστημα με καλά χαρακτηρισμένο qubit.
2. Η δυνατότητα αρχικοποίησης της κατάστασης των qubits σε μια απλή κατάσταση αναφοράς.
3. Μεγάλοι σχετικοί χρόνοι αποσυγκόλλησης.
4. Ένα "καθολικό" σύνολο κβαντικών πυλών.
5. Ικανότητα μέτρησης ειδικά για qubit.