

Title: Interpretation of Quantum Theory: Lecture 20

Date: Mar 17, 2005 02:15 PM

URL: <http://pirsa.org/05030114>

Abstract:

Experimental tests of Bell's inequalities: more ideal than ever*

Perimeter Institute, Waterloo, march 2005

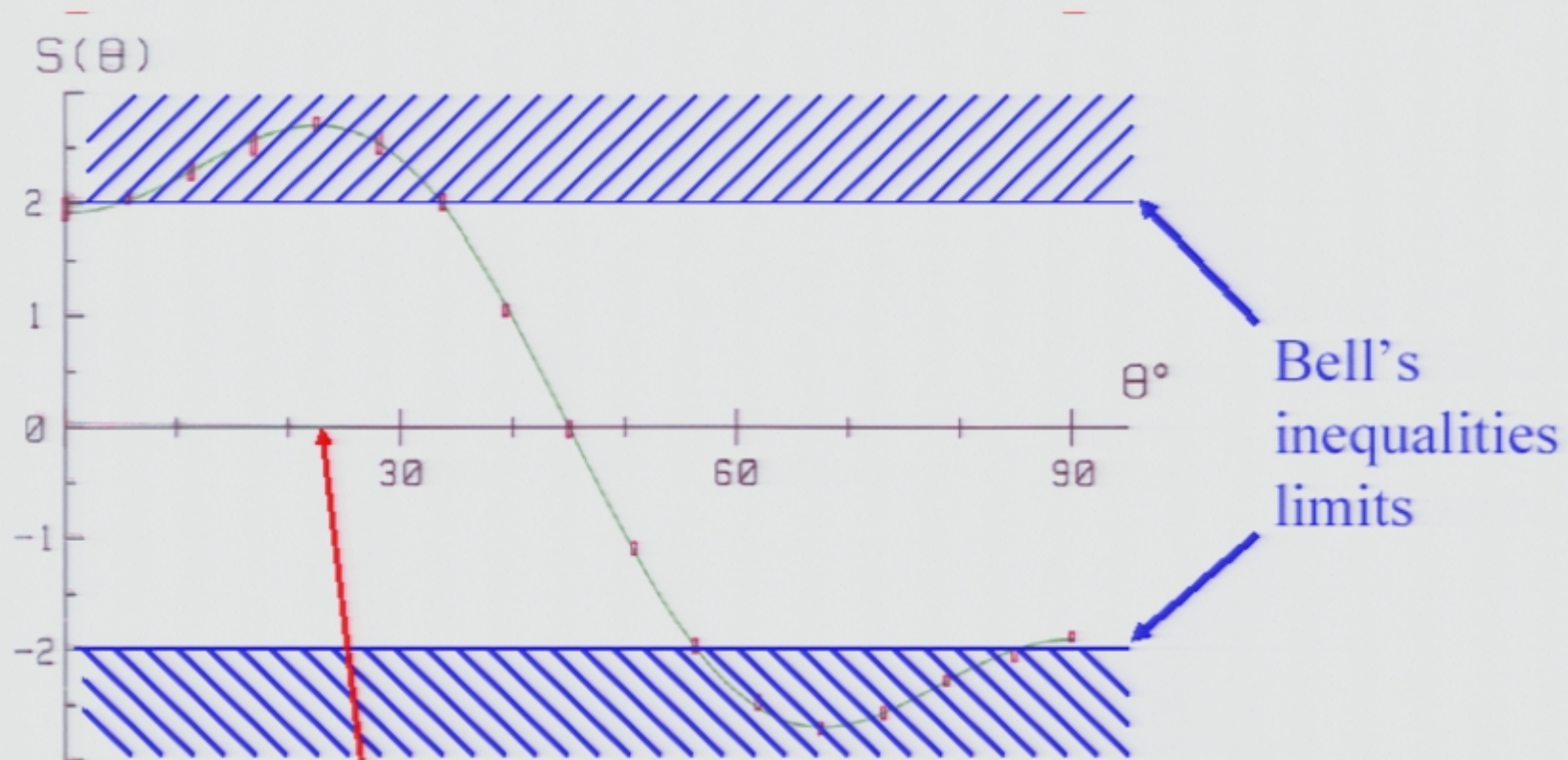
Alain Aspect

Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique

<http://atomoptic.iota.u-psud.fr>

A review on Bell's inequalities: AA quant-ph/0402001

Experiment with 2- channels polarizers



$$\text{For } \theta = (\mathbf{a}, \mathbf{b}) = (\mathbf{b}, \mathbf{a}') = (\mathbf{a}', \mathbf{b}) = \frac{\pi}{8} \quad S_{\text{exp}}(\theta) = 2.697 \pm 0.015$$

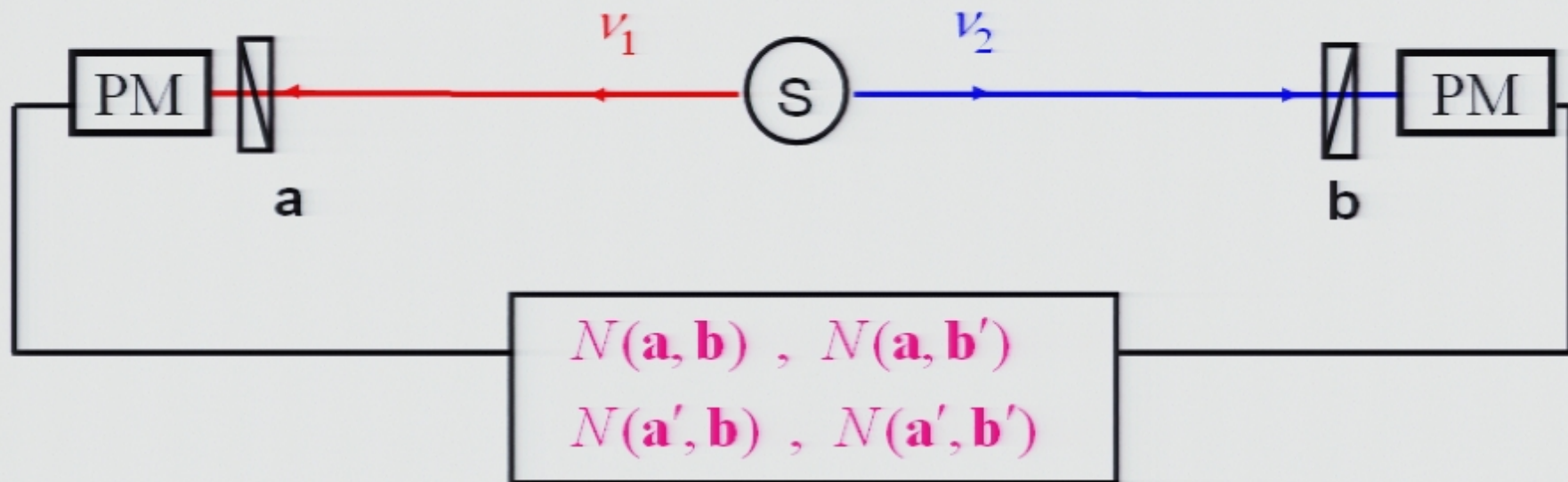
Violates Bell's inequality ($S \leq 2$) by $> 40 \sigma$

No auxiliary calibration necessary.

Excellent agreement with Q M $S_{\text{exp}} = 2.70$

Experiment with optical switches

AA, J. Dalibard, G. Roger, PRL 1982



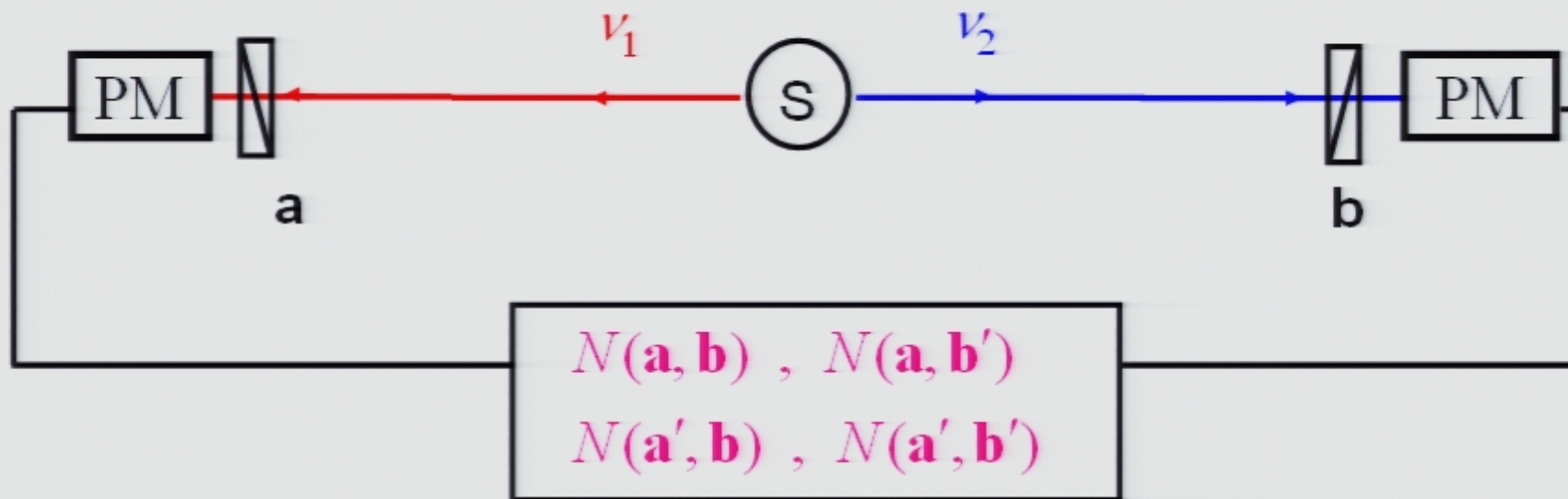
$$\begin{array}{ccc}
 \begin{array}{c} \text{---} \Delta \text{---} \\ \text{---} \end{array} & \xleftarrow{\quad} & \text{---} \\
 \text{---} \vec{a} & & \text{---} \vec{b}
 \end{array}$$

$$A(\lambda, \vec{a}) = \pm 1$$

$$B(\lambda, \vec{b}) = \pm 1$$

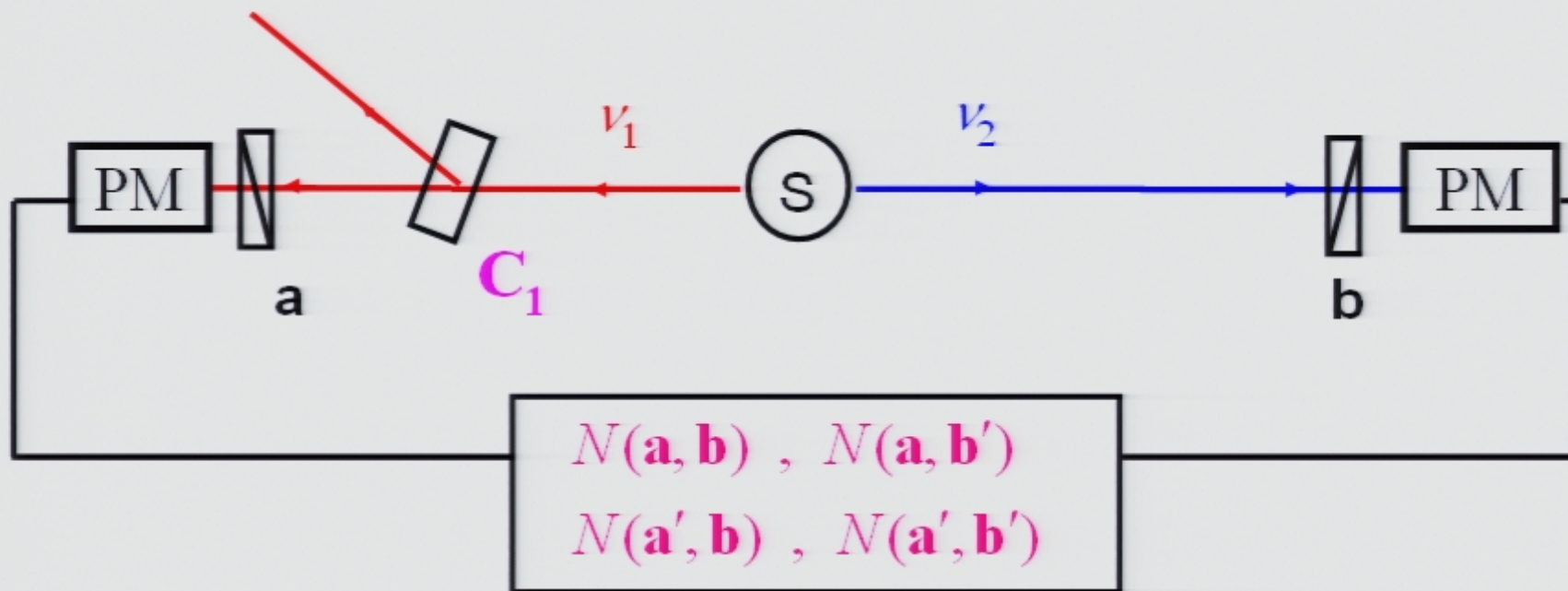
Experiment with optical switches

AA, J. Dalibard, G. Roger, PRL 1982



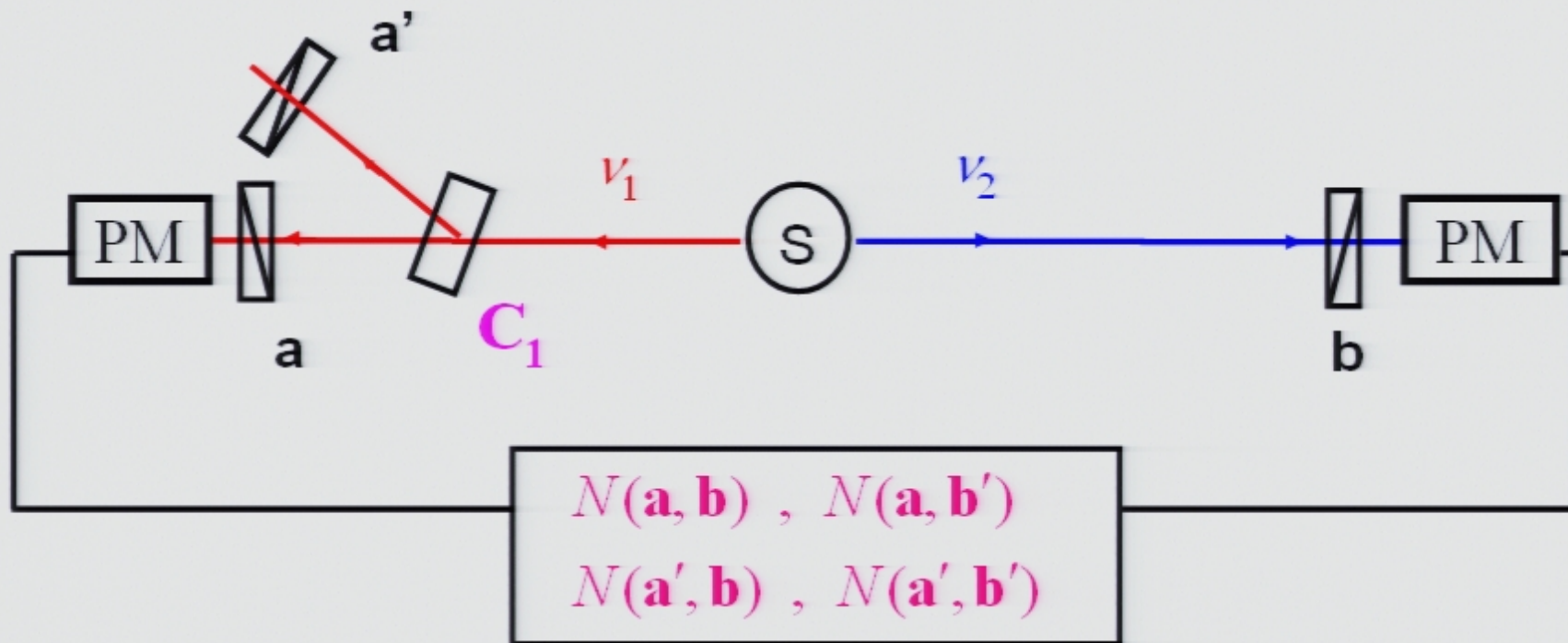
Experiment with optical switches

AA, J. Dalibard, G. Roger, PRL 1982



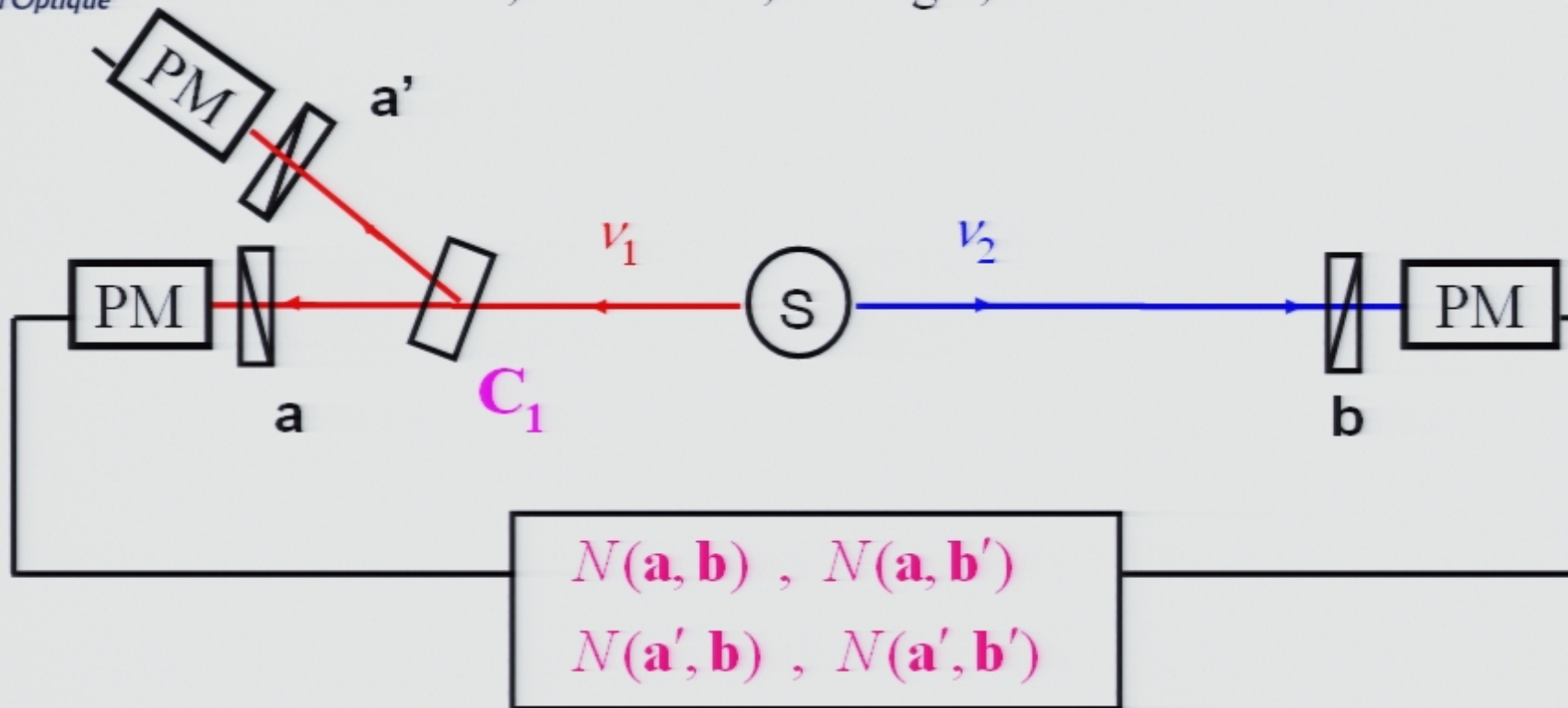
Experiment with optical switches

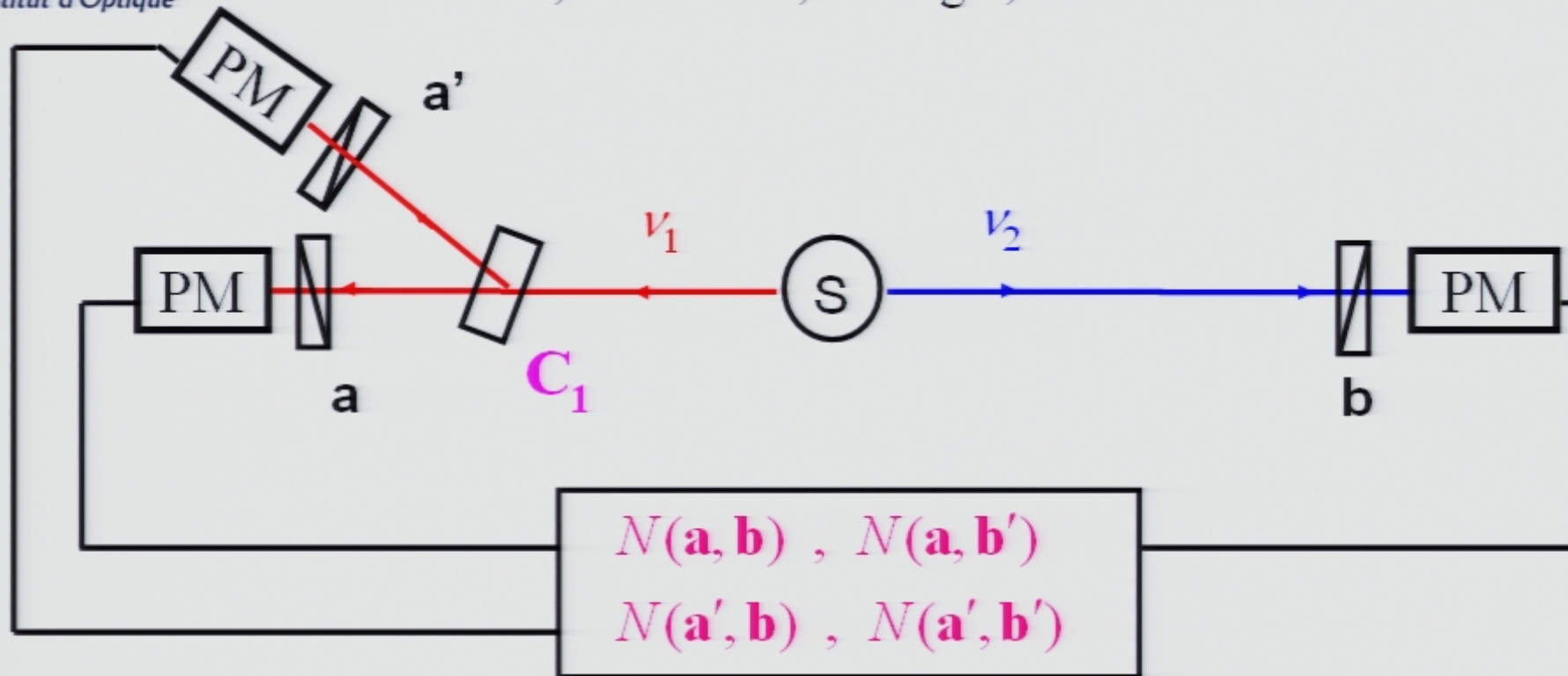
AA, J. Dalibard, G. Roger, PRL 1982



Experiment with optical switches

AA, J. Dalibard, G. Roger, PRL 1982

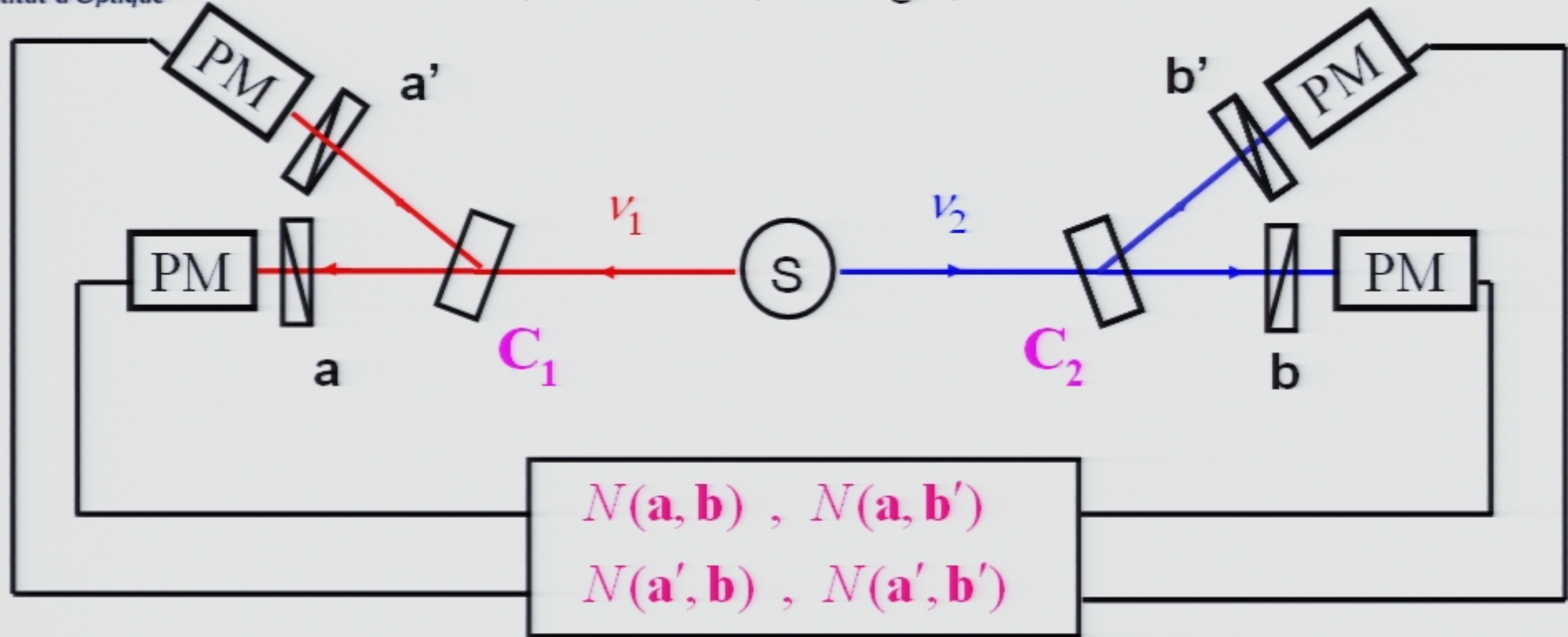




Each switch redirects the photon towards one of two polarizers in different orientations: equivalent to a single polarizer rapidly rotated from an orientation to the other one.

Experiment with optical switches

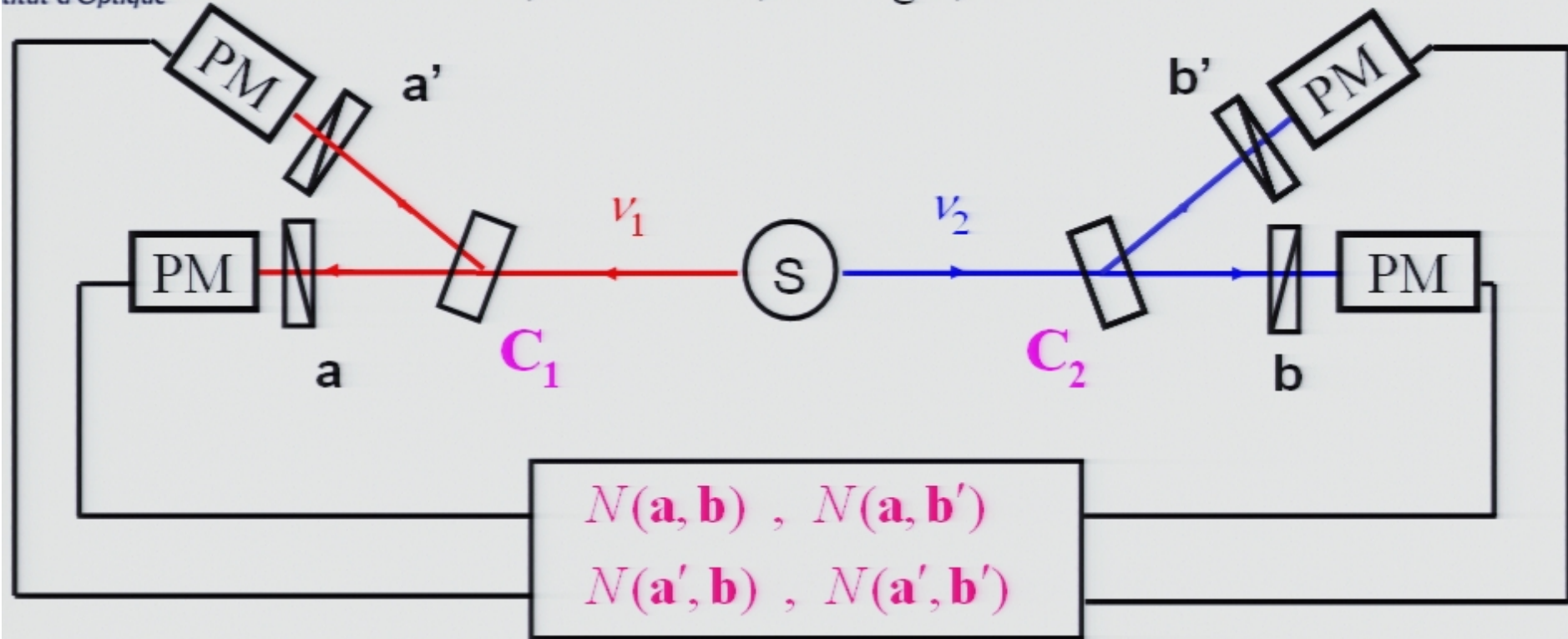
AA, J. Dalibard, G. Roger, PRL 1982



Each switch redirects the photon towards one of two polarizers in different orientations: equivalent to a single polarizer rapidly rotated from an orientation to the other one.

Experiment with optical switches

AA, J. Dalibard, G. Roger, PRL 1982

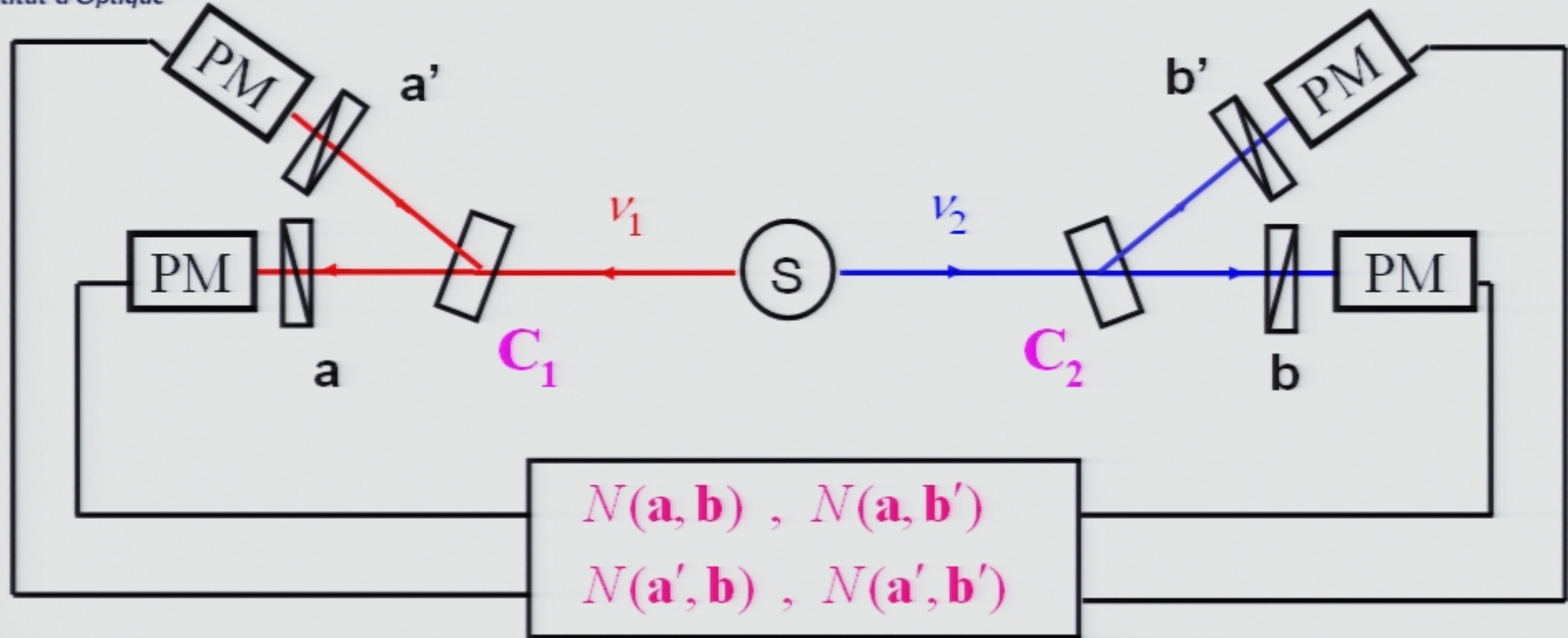


Each switch redirects the photon towards one of two polarizers in different orientations: equivalent to a single polarizer rapidly rotated from an orientation to the other one.

Switching period: 10 ns $\ll C_1 C_2 / c = 40$ ns

Spacelike separated events

Experiment with optical switches

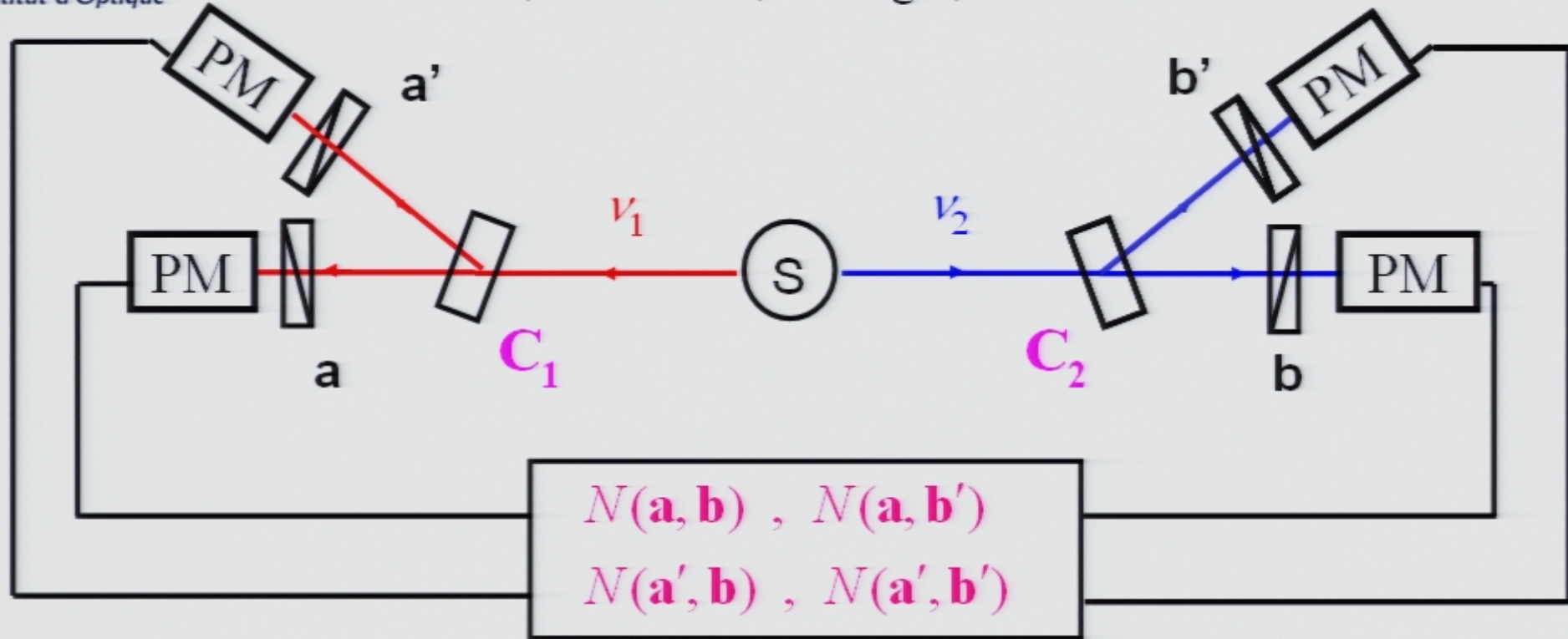


In the 1982 Orsay experiment, each switch C_1 and C_2 worked in a quasi-periodic way, not truly random.

But the two switches were driven by two different generators, drifting independently.

Experiment with optical switches

AA, J. Dalibard, G. Roger, PRL 1982

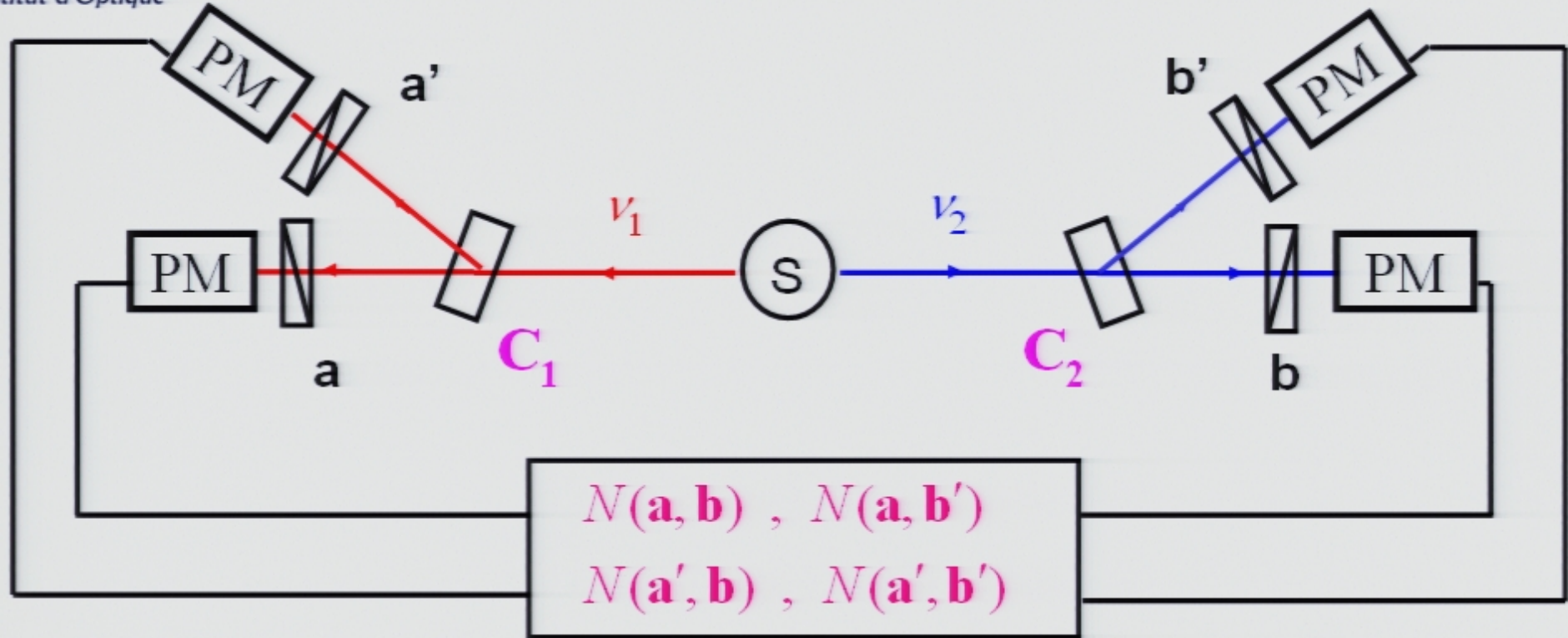


Each switch redirects the photon towards one of two polarizers in different orientations: equivalent to a single polarizer rapidly rotated from an orientation to the other one.

Switching period: 10 ns $\ll C_1 C_2 / c = 40$ ns

Spacelike separated events

Experiment with optical switches



In the 1982 Orsay experiment, each switch C_1 and C_2 worked in a quasi-periodic way, not truly random.

But the two switches were driven by two different generators, drifting independently.

Experiment with optical switches: results

Reduced signal (limited aperture of the switches)

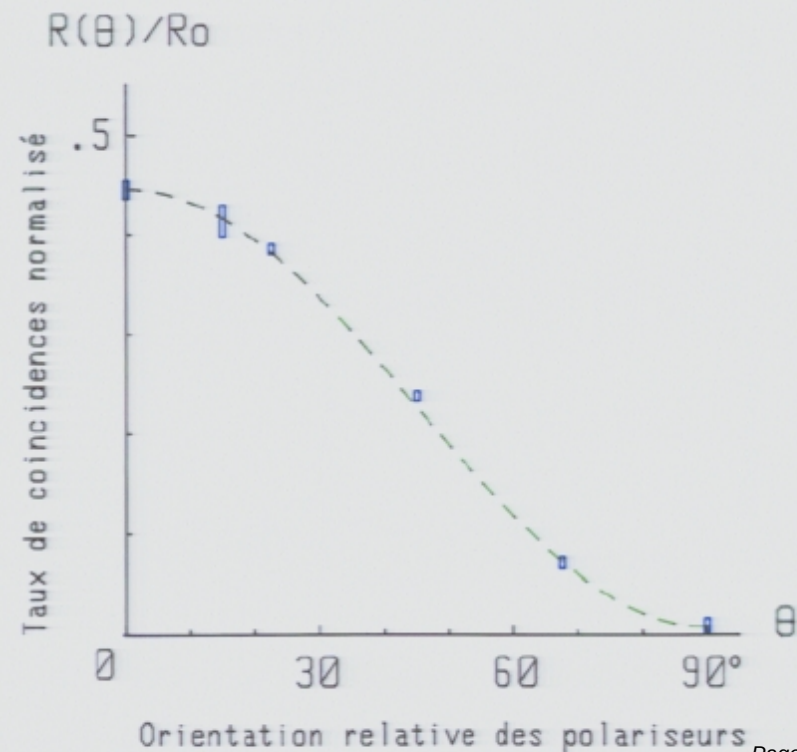
⇒ Averaging necessary (15 hours)

Violation of the relevant Bell's inequality $\delta \leq 0$

$$\delta_{\text{exp}} = 0.064 \pm 0.01$$

Good agreement with QM :

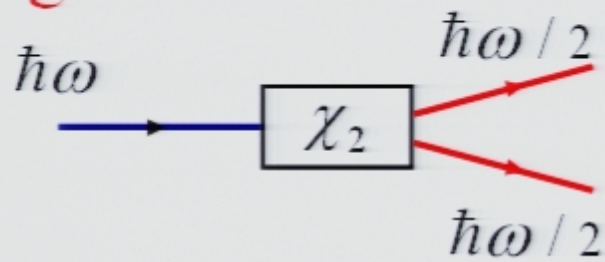
$$\delta_{\text{QM}} = 0.059$$



Towards the ideal experiment

Perrie et al. (1985): pair of UV photons (metastable deuterium desexcitation)

4th generation: entangled photons by parametric splitting



Alley, Mandel, Rarity, Martienssen, Kimble, Gisin, Zeilinger (super source by Kwiat, Weinfurter et al.)

- Perfect correlation: violation of BI by 100σ (Innsbruck 1998)
- Other observables: time / energy; position / momentum
- Use of optical fibers

⇒ large distances (Malvern, Geneva)

⇒ experiments with **active random polarizers** (Innsbruck 1998)

Strong enforcement of the locality condition

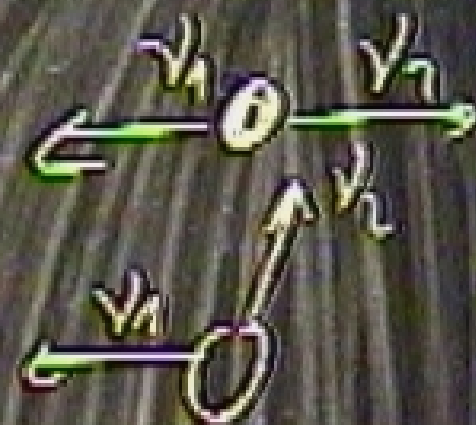
• Implemented in laboratory classes at Institut d'Optique: $S_{\text{max}} > 2.5$



$\mathcal{K}$

$$B(\lambda, \vec{b}) = \pm 1$$

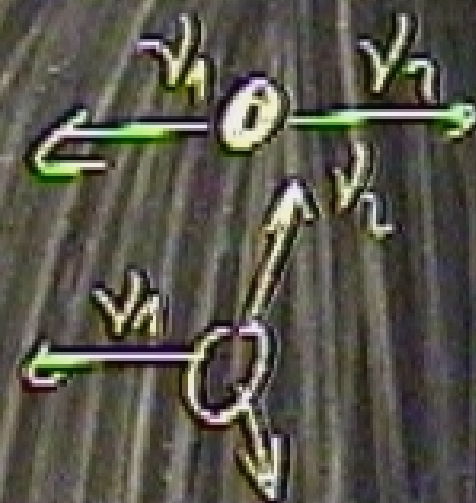
$$(\vec{a}) = \pm 1$$





$$B(\lambda, \vec{b}) = \pm 1$$

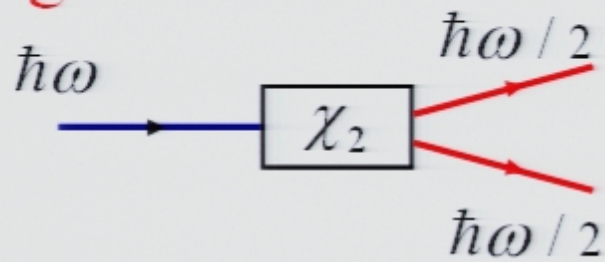
$$(\vec{a}) = \begin{pmatrix} + \\ - \end{pmatrix} 1$$



Towards the ideal experiment

Perrie et al. (1985): pair of UV photons (metastable deuterium desexcitation)

4th generation: entangled photons by parametric splitting



Alley, Mandel, Rarity, Martienssen, Kimble, Gisin, Zeilinger (super source by Kwiat, Weinfurter et al.)

- Perfect correlation: violation of BI by 100σ (Innsbruck 1998)
- Other observables: time / energy; position / momentum
- Use of optical fibers

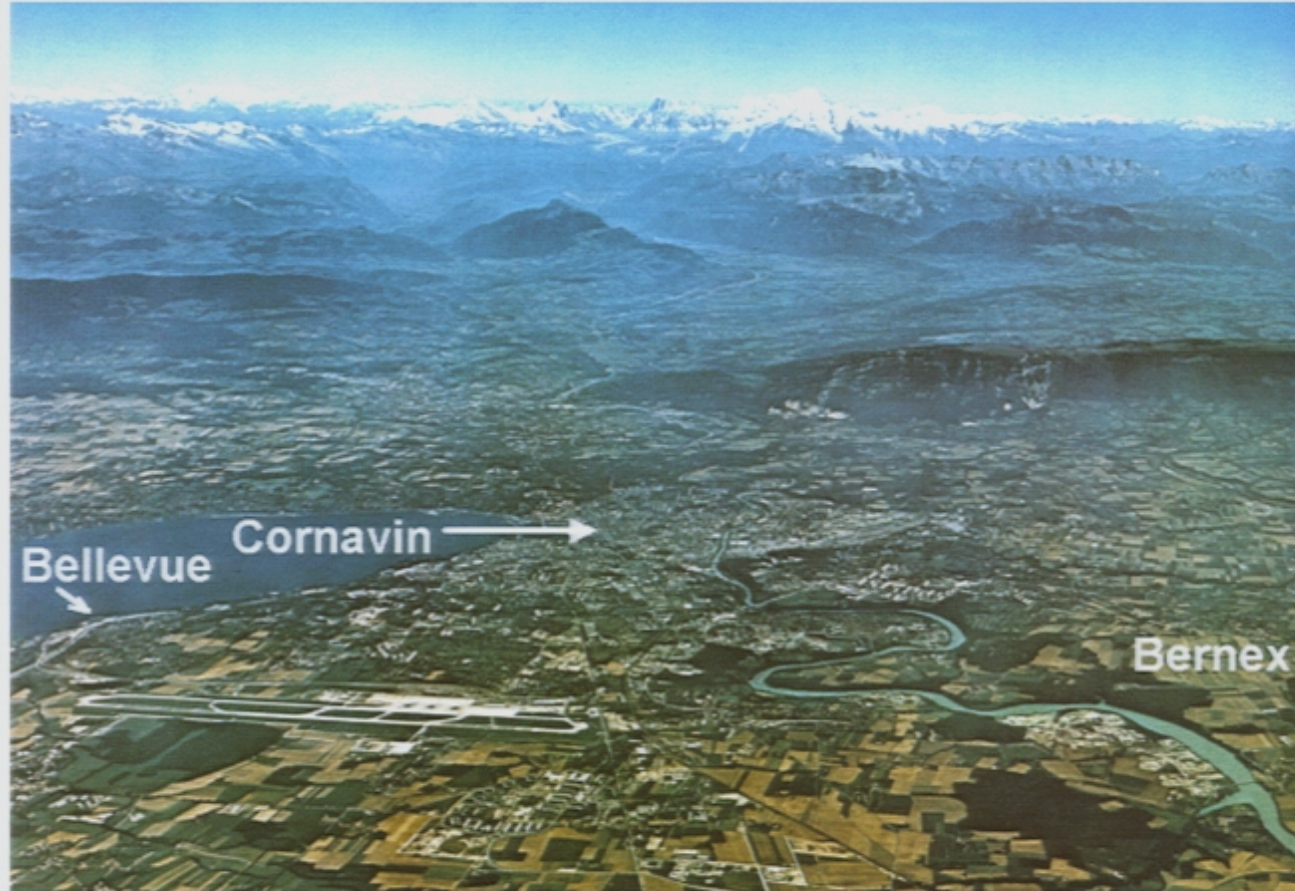
⇒ large distances (Malvern, Geneva)

⇒ experiments with **active random polarizers** (Innsbruck 1998)

Strong enforcement of the locality condition

• Implemented in laboratory classes at Institut d'Optique: $S_{\text{max}} > 2.5$

Geneva experiment

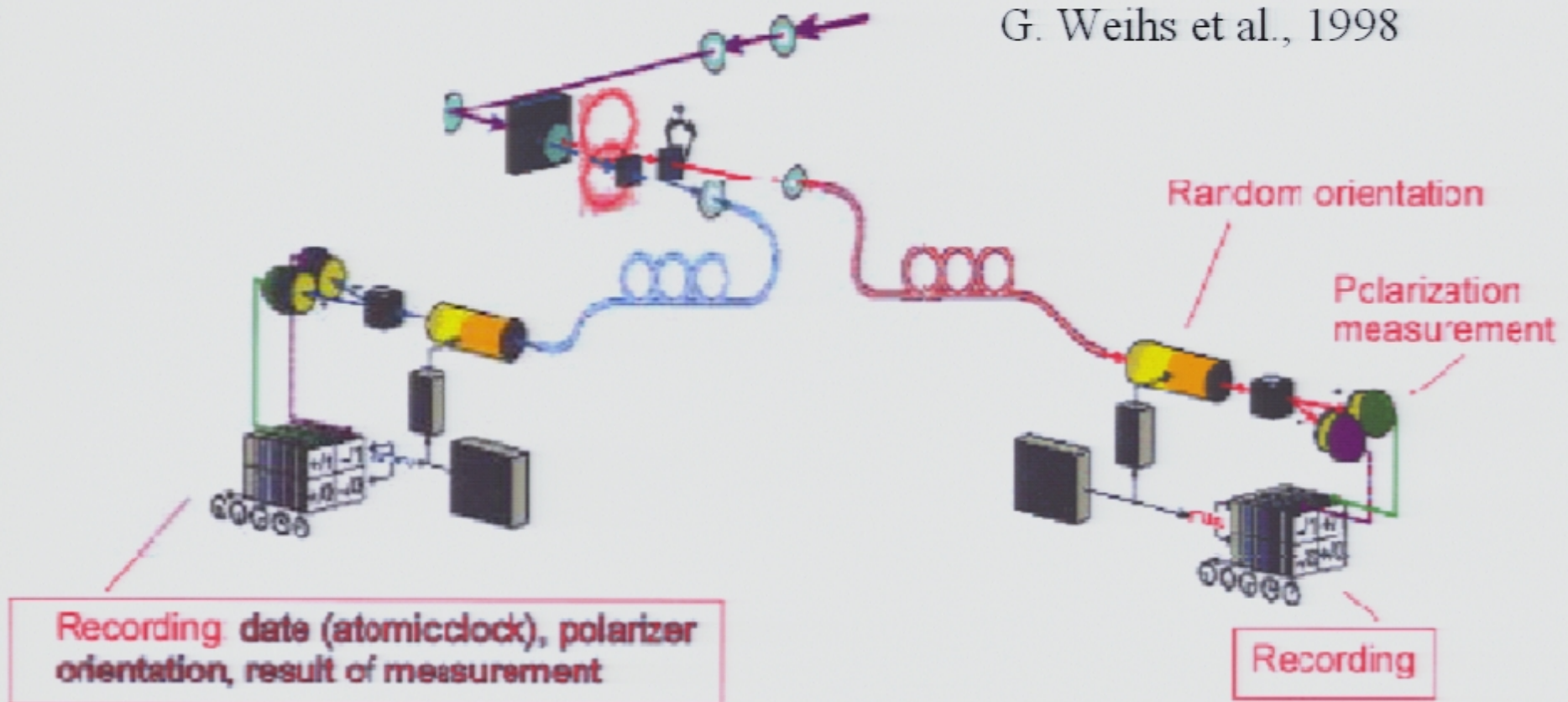


Use of optical fibers of the commercial telecom network

Innsbruck experiment

Experiment with randomly reoriented polarizers

G. Weihs et al., 1998



Strong violation of Bell's inequalities, agreement with QM

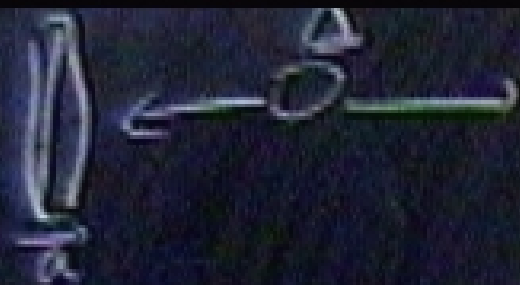
Towards the ideal experiment

4th generation *bis*: massive particles pairs

- Rydberg atoms and RF photons (ENS Paris 2000)
- Trapped ions (Boulder, 2000): entanglement “on demand”
 - ⇒ experiments with 100% detection efficiency
 - closure of the “detection loophole”

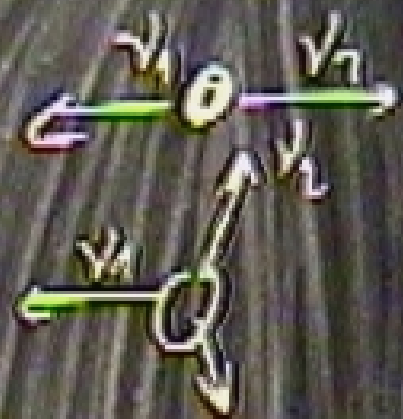
4th generation *ter*: continuous variables

- Quadratures of macroscopic light beams (Caltech, Orsay, Canberra)
 - ⇒ 99 % detection efficiency; sophisticated schemes
 - ⇒ locality condition « easy » to enforce

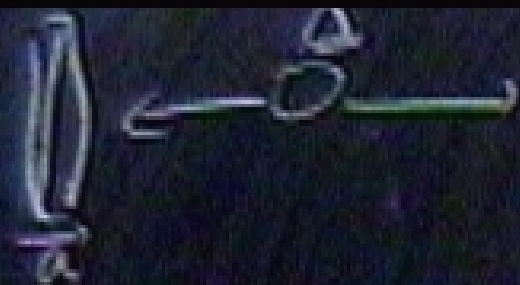


$$A(\lambda, \vec{a}) = \pm 1$$

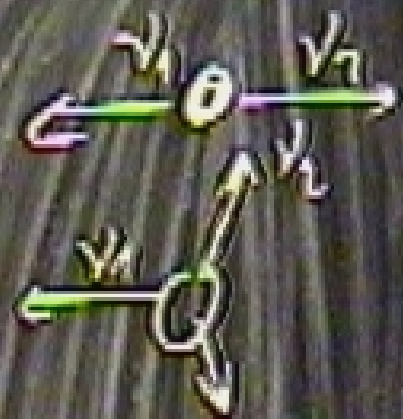
$$B(\lambda, \vec{b}) = \pm 1$$



$$\Delta = A(\lambda, a)B(\lambda, b) - A(\lambda, a')B(\lambda, b) + A(\lambda, a')B(\lambda, b') - A(\lambda, a)B(\lambda, b')$$



$$B(\lambda, \vec{b}) = \pm 1$$



$$A(\lambda, \vec{a}) = \pm 1$$

$$= A(\lambda, a) B(\lambda, b) - A(\lambda, a) B(\lambda, b') + A(\lambda, a') B(\lambda, b) + A(\lambda, a') B(\lambda, b')$$

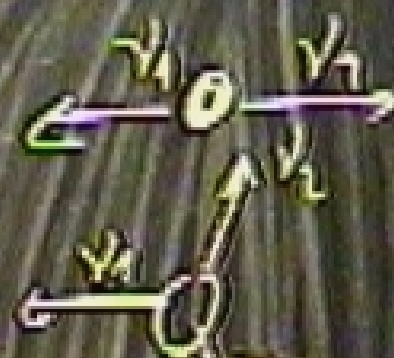
$$\lambda p(\lambda)$$

$$E(a, b) - E(a, b') + E(a', b) + E(a', b')$$



$$B(\lambda, b) = \pm 1$$

$$A(\lambda, a) = \pm 1$$



$$\Delta = A(\lambda, a)B(\lambda, b) - A(\lambda, a)B(\lambda, b') + A(\lambda, a')B(\lambda, b) - A(\lambda, a')B(\lambda, b')$$

$$\int d\lambda \rho(\lambda) \Delta = E(a, b) - E(a, b') + E(a', b) - E(a', b')$$

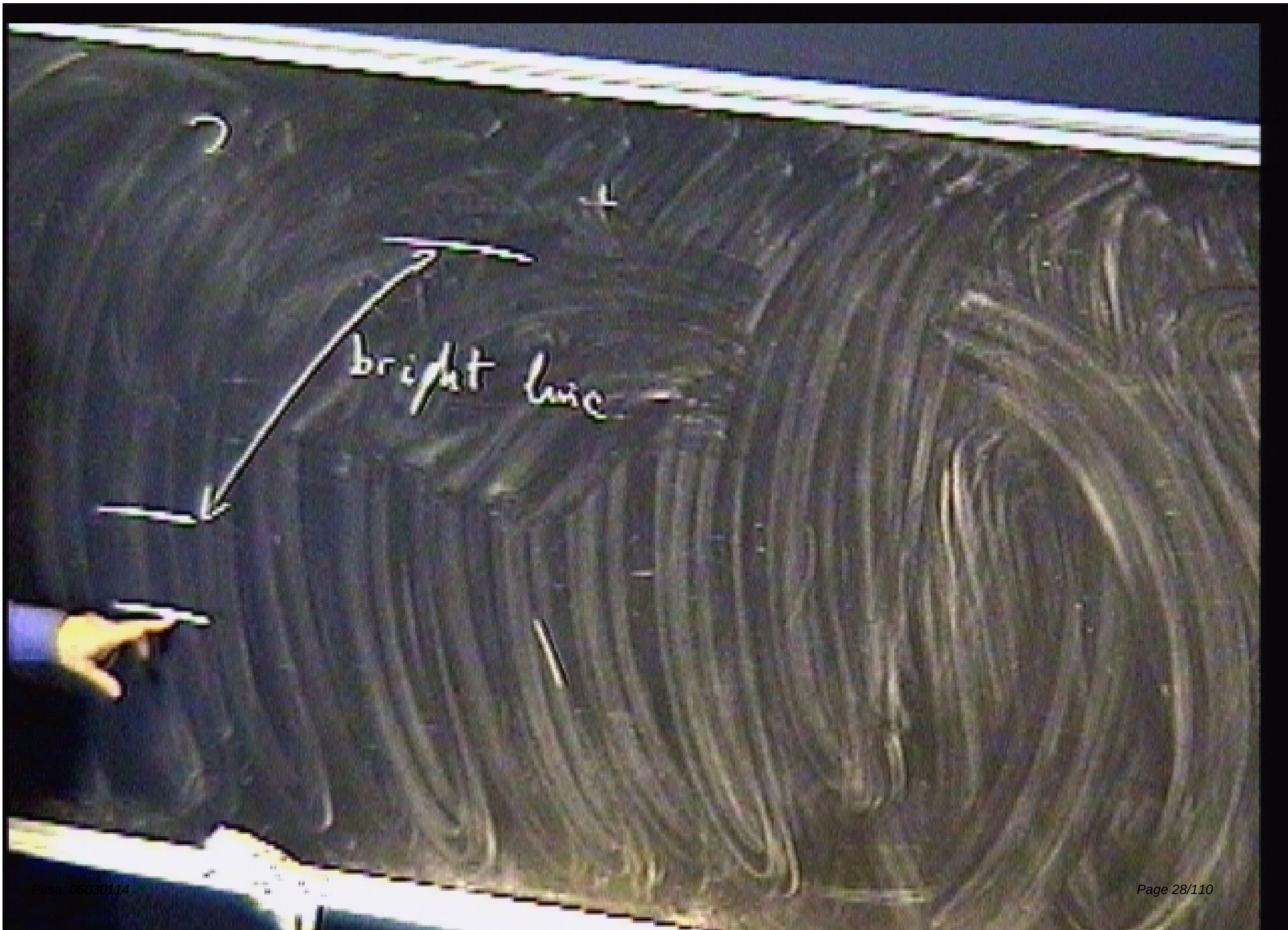
Towards the ideal experiment

4th generation *bis*: massive particles pairs

- Rydberg atoms and RF photons (ENS Paris 2000)
- Trapped ions (Boulder, 2000): entanglement “on demand”
 - ⇒ experiments with 100% detection efficiency
 - closure of the “detection loophole”

4th generation *ter*: continuous variables

- Quadratures of macroscopic light beams (Caltech, Orsay, Canberra)
 - ⇒ 99 % detection efficiency; sophisticated schemes
 - ⇒ locality condition « easy » to enforce



Towards the ideal experiment

4th generation *bis*: massive particles pairs

- Rydberg atoms and RF photons (ENS Paris 2000)
- Trapped ions (Boulder, 2000): entanglement “on demand”
 - ⇒ experiments with 100% detection efficiency
 - closure of the “detection loophole”

4th generation *ter*: continuous variables

- Quadratures of macroscopic light beams (Caltech, Orsay, Canberra)
 - ⇒ 99 % detection efficiency; sophisticated schemes
 - ⇒ locality condition « easy » to enforce

A loophole free experiment?

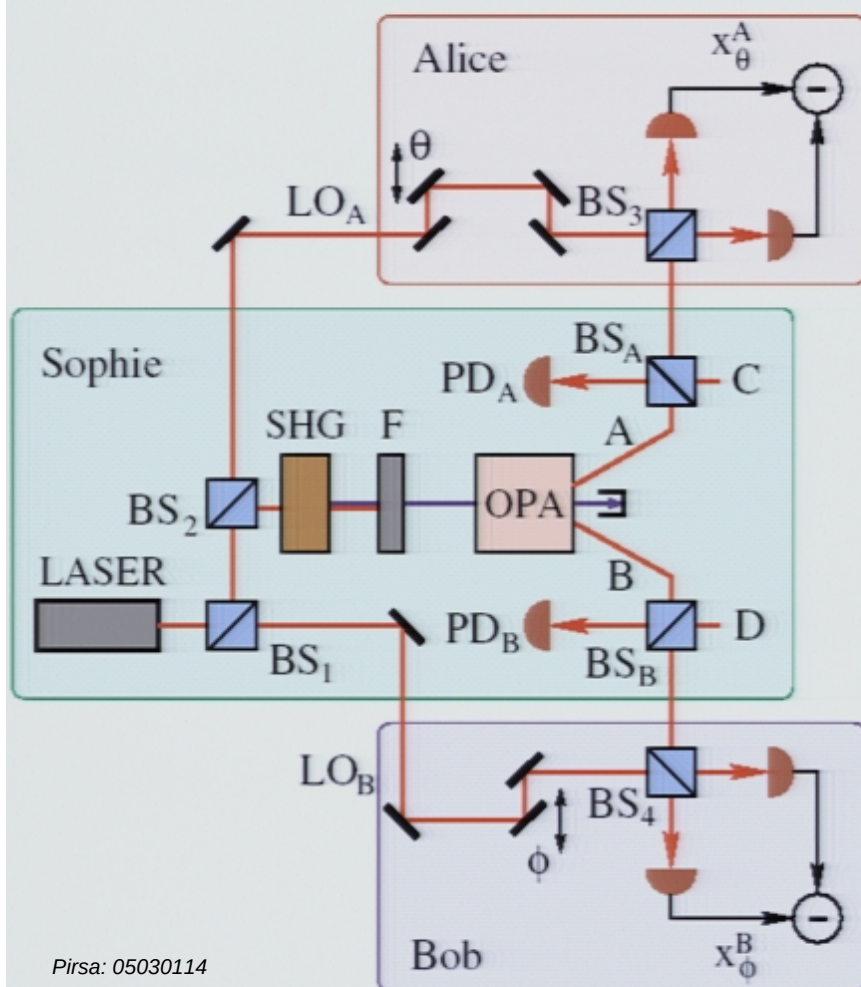
VOLUME 93, NUMBER 13

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
24 SEPTEMBER 2004

Proposal for a Loophole-Free Bell Test Using Homodyne Detection

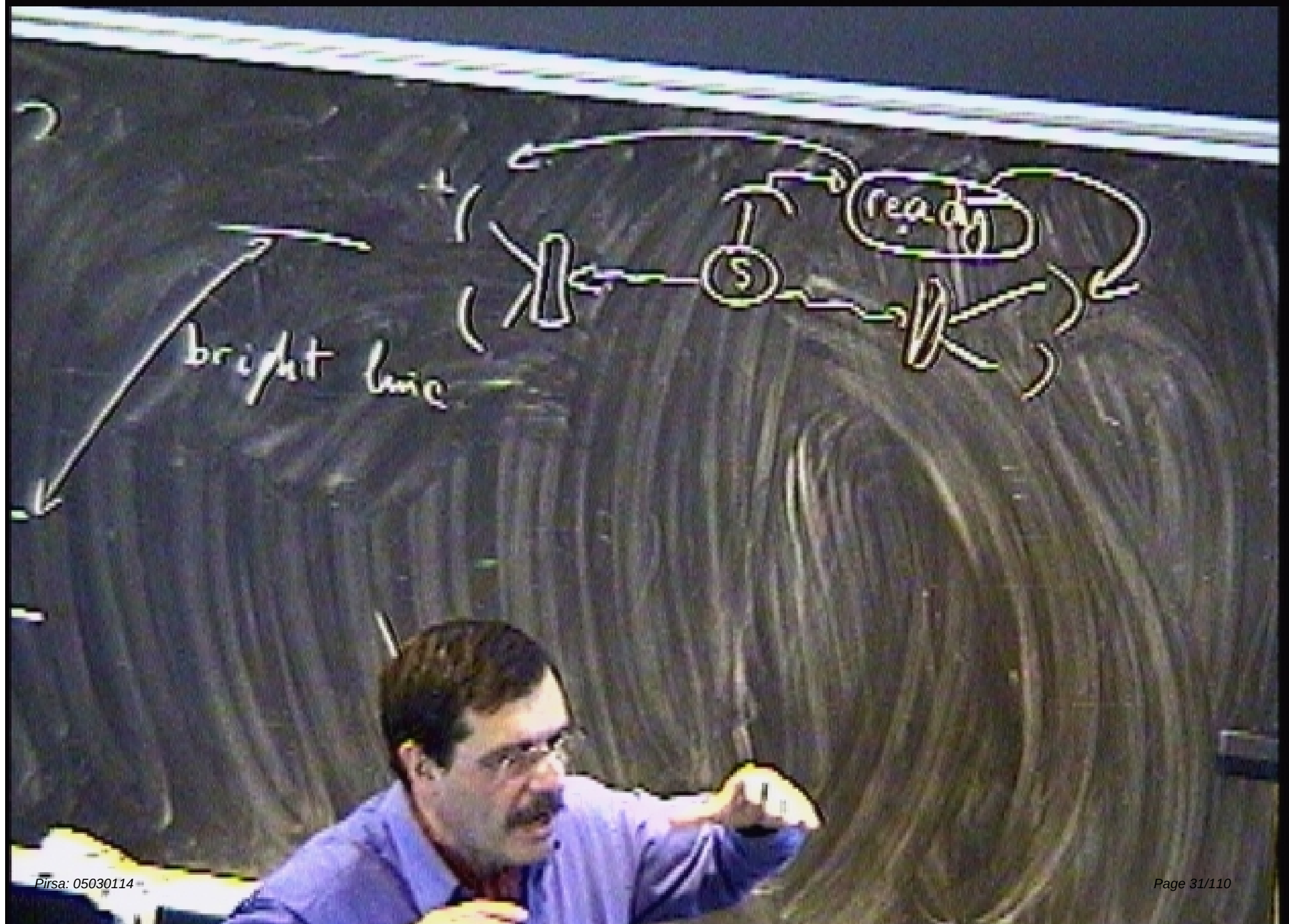
R. García-Patrón,¹ J. Fiurášek,^{1,2} N. J. Cerf,¹ J. Wenger,³ R. Tualle-Brouiri,³ and Ph. Grangier³



Almost 100% detectivity can be reached with homodyne detection of quadratures of a macroscopic field

A joint detection on PD_A and PD_B :

- Delivers an “event-ready” signal
- “Creates” a non Gaussian entangled state of field quadratures in two modes (by subtraction of 1 photon on each mode)



A loophole free experiment?

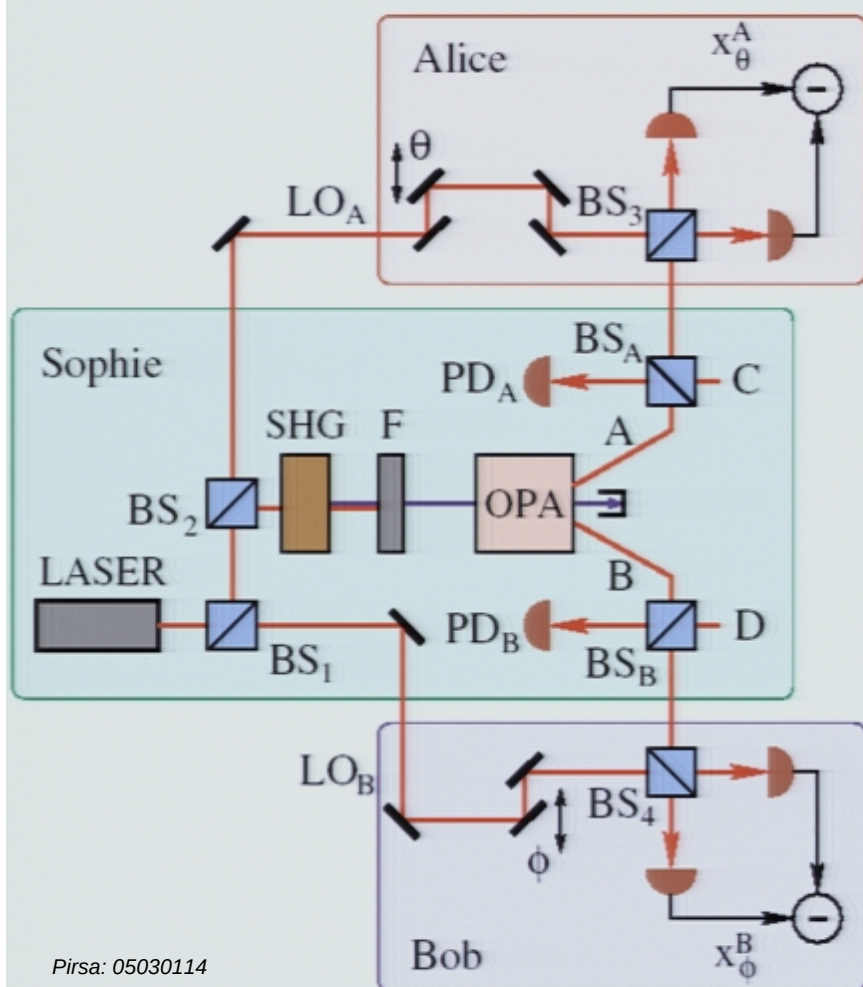
VOLUME 93, NUMBER 13

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
24 SEPTEMBER 2004

Proposal for a Loophole-Free Bell Test Using Homodyne Detection

R. García-Patrón,¹ J. Fiurášek,^{1,2} N. J. Cerf,¹ J. Wenger,³ R. Tualle-Brouiri,³ and Ph. Grangier³



Almost 100% detectivity can be reached with homodyne detection of quadratures of a macroscopic field

A joint detection on PD_A and PD_B :

- Delivers an “event-ready” signal
- “Creates” a non Gaussian entangled state of field quadratures in two modes (by subtraction of 1 photon on each mode)

From EPR to tests of Bell's inequalities: entanglement as a conceptual question

The point of view of a naive experimentalist*

- Einstein-Podolsky-Rosen correlations

The Einstein-Bohr debate (1935-1955)

- Bell's theorem (1965)

From epistemology back to physics

- Experimental tests: a brief review (1972-2002)

Towards the ideal experiment

- Conclusion

Quantum non locality: A real problem ?

Violation of Bell's inequalities: what can we conclude? (conceptual issue)

- Accept negative probabilities (???)
- Failure of local realism à la Einstein: quantum non locality
- Is it a real problem ?

Violation of Bell's inequalities: what can we conclude? (conceptual issue)

- Accept negative probabilities (???)
- Failure of local realism à la Einstein: quantum non locality
- Is it a real problem ?

Failure of Einstein's local realism

If the EPR conclusion was not correct then one should...

« - either drop the need of the independence of the physical realities present in different parts of space

- or accept that the measurement of S_1 changes (instantaneously) the real situation of S_2 »

A. Einstein

The violation of Bell's inequalities show that we must renounce Einstein's local realism:

- independence of physical realities of separated (in a relativistic sense) subsystems;
- no faster than light connection

Not really independent hypotheses

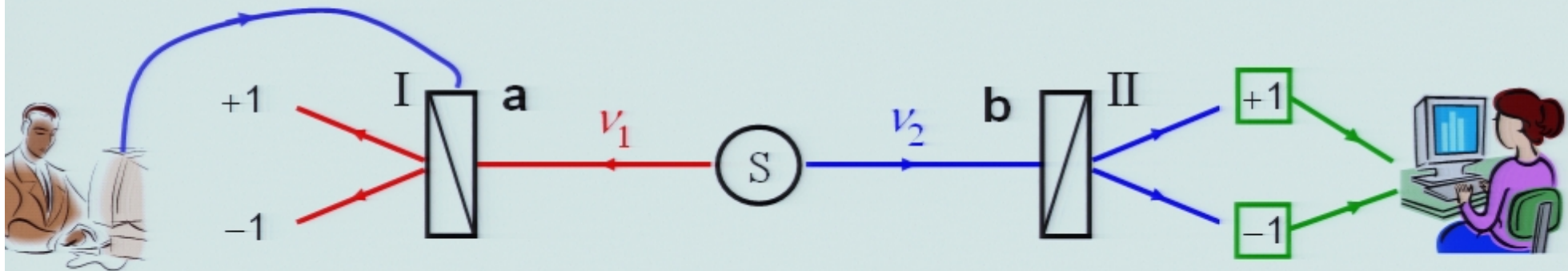
Quantum non locality

We must abandon Einstein's local realism:

- independence of physical realities of separated (in a relativistic sense) subsystems;
- no faster than light connection

Do NOT conclude that one can use entanglement to send
faster than light signals

No faster than light signaling with EPR entangled pairs



Arthur changes the setting of polarizer I from **a** to **a'**: can Beatrice **instantaneously** observe a change on its measurements at II ?

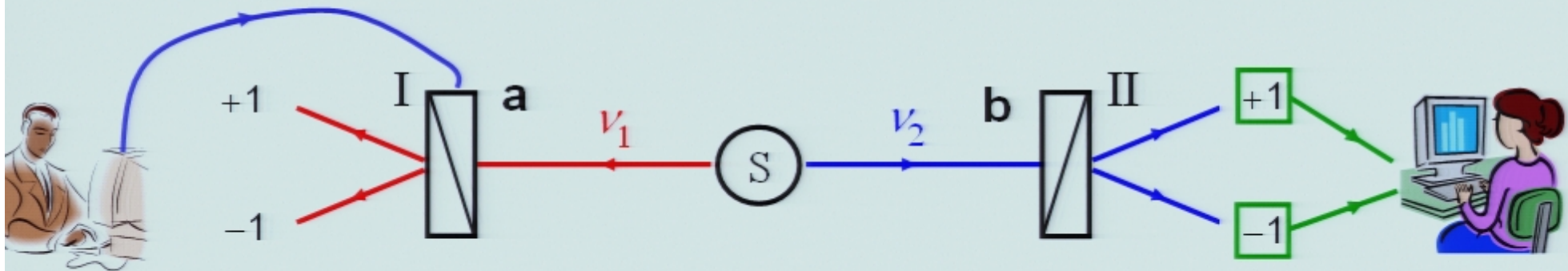
Single detections: $P_+(\mathbf{b}) = P_-(\mathbf{b}) = 1/2$ No information about **a**

Joint detections: $P_{++}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = P_{--}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \frac{1}{2} \cos^2(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ etc.

Instantaneous change !

Faster than light signaling ?

No faster than light signaling with EPR entangled pairs



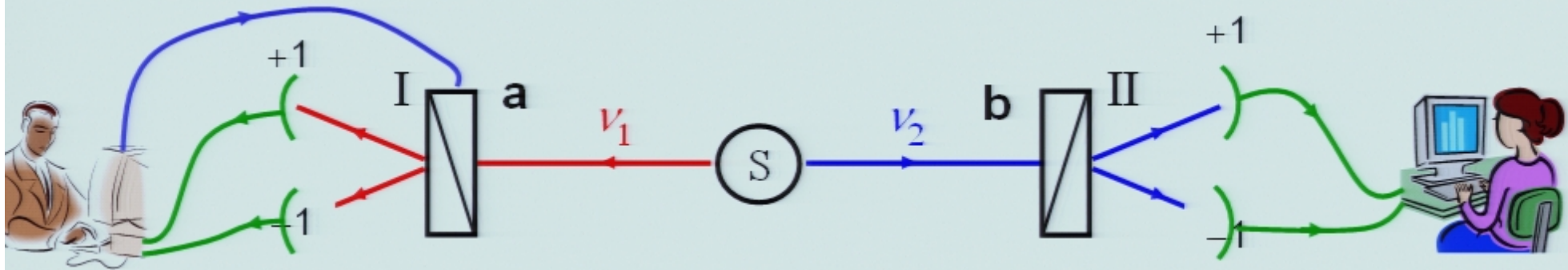
Arthur changes the setting of polarizer I from **a** to **a'**: can Beatrice **instantaneously** observe a change on its measurements at II ?

Joint detections: $P_{++}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = P_{--}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \frac{1}{2} \cos^2(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ etc.

Instantaneous change ! Faster than light signaling ?

To measure $P_{++}(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ Beatrice must compare her results to the results at I: the **transmission** of these results from I to Beatrice is done on a **classical channel**, **not faster than light**.

So there is no problem ?



View *a posteriori* onto the experiment:

During the runs, Arthur and Beatrice carefully record the time and result of each measurement.

After completion of the experiment, they meet and compare their data...

... and they find that $P_{++}(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ had changed instantaneously when Arthur had changed his polarizers orientation...

on locality is there, though it cannot be used for « practical telegraphy »

Quantum non locality

- Is it a real problem ?

Quantum non locality

- Is it a real problem ?

« It has not yet become obvious to me that there is no real problem. I cannot define the real problem, therefore I suspect there's no real problem, but I am not sure there is no real problem. So that's why I like to investigate things.

Quantum non locality

- Is it a real problem ?

« It has not yet become obvious to me that there is no real problem. I cannot define the real problem, therefore I suspect there's no real problem, but I am not sure there is no real problem. So that's why I like to investigate things. »

R. Feynman

Int. Journ. of Theoret. Phys. 21, 467 (1982)*

The amazing properties of entanglement

Since the EPR paper (1935), it took more than 40 years (and the genius of John Bell) for a significant fraction of the physicists to recognise **non locality of entangled pairs** as a new amazing concept in quantum mechanics.

It took another decade to discover that **entanglement** can be a physical resource for new ways of handling information.

We have certainly not yet **discovered all the amazing properties of entanglement**, and the most **efficient ways of using entanglement** remain probably to be invented.

There are plenty of possibilities with photons, ions, atoms, supra conductor or semi conductor nanochips... to develop the applications of the new quantum revolution.

La lumière: onde ou photon ?

Académie des sciences

Lyon 25 janvier 2005

Alain Aspect

Académie des sciences

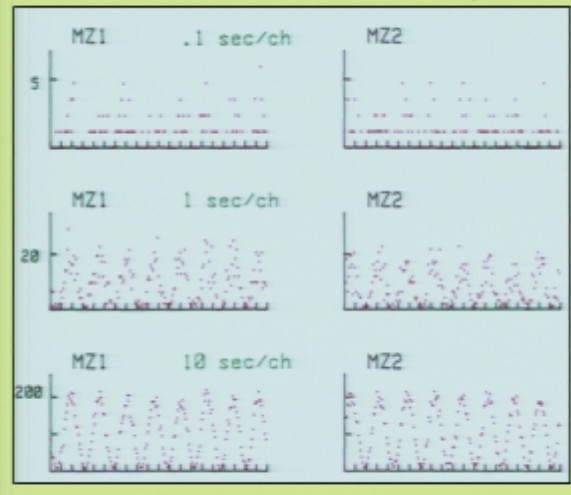
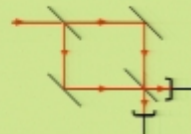
Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, Orsay

Expérience: Timothée Toury et palais de la découverte

Interférences avec un photon unique

Interféromètre éclairé par une source de photons uniques ($\alpha < 1$ observé)

Orsay 1985

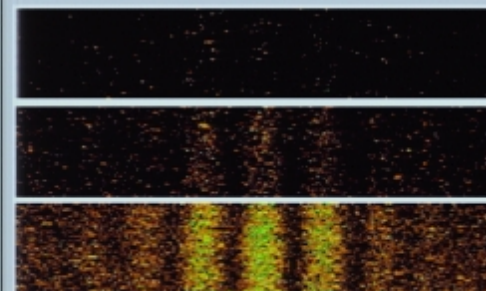


Cachan 2005



Voir les franges se construire

http://www.physique.ens-cachan.fr/franges_photon/interference.htm



Comportement ondulatoire observé sans ambiguïté

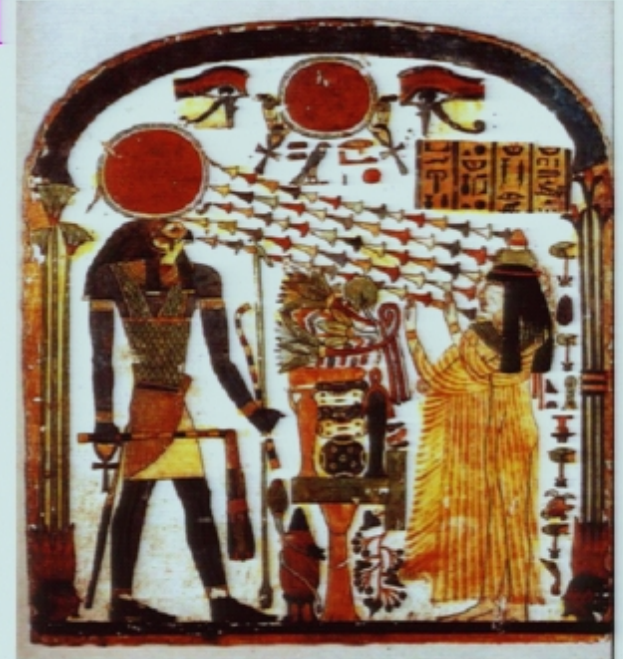
16

La lumière à travers les âges

- Antiquité (Égypte, Grèce): **particules vers l'œil** ou **depuis l'œil** (Epicure, Aristote, Euclide)



Moyen âge, renaissance:
ingénierie: lunettes correctrices, lunette astronomique (Al Hazen, Bacon, Leonard de Vinci, Galilée, Tycho...)



XVIIème siècle: **Ondes** (analogie « ronds dans l'eau »):
Pisa: 05030114



- Newton (Opticks, 1702): **particules** (couleurs diverses)



XIX^{ème} siècle. Le triomphe du modèle ondulatoire



Young, Fresnel (1822):
interférence, diffraction,
polarisation



Maxwell
(1870): la
lumière est
une onde
électro
magnétique



1900: « La fin
de la
physique »
(Lord
Rayleigh) ...
mis à part
deux détails!

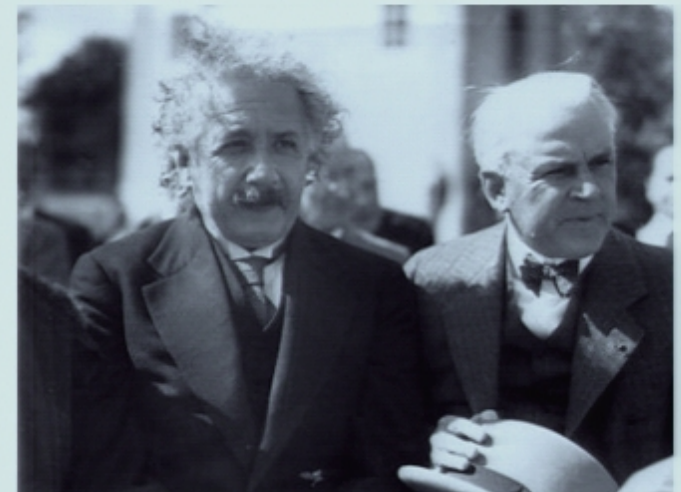
Début XX^{ème}: Les photons (le retour des particules)

- **Einstein** (1905). Lumière constituée de **quantas**, grains élémentaires d'énergie $E = h\nu$ et d'impulsion $p = h\nu / c$ (baptisés « photons » en 1922).

➤ Prédictions quantitatives pour l'effet photoélectrique

➤ Idées mal acceptées jusqu'aux travaux expérimentaux de Millikan (1915, effet photoélectrique).

➤ Einstein prix Nobel (1922) pour l'effet photoélectrique



Début XX^{ème}: Les photons (le retour des particules)

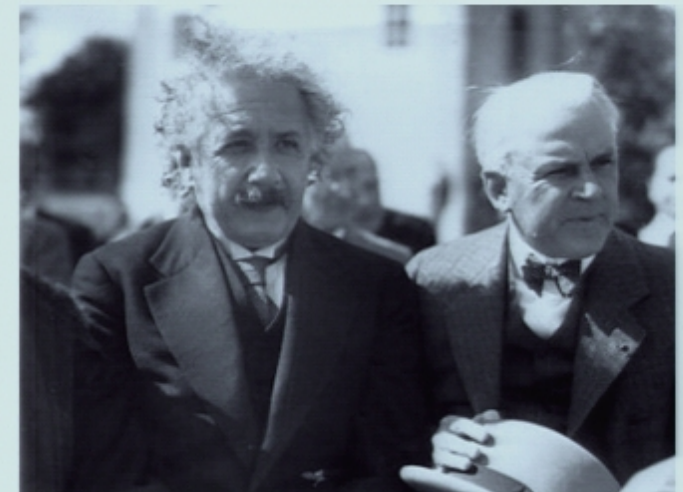
- **Einstein** (1905). Lumière constituée de **quantas**, grains élémentaires d'énergie $E = h\nu$ et d'impulsion $p = h\nu / c$ (baptisés « photons » en 1922).



➤ Prédictions quantitatives pour l'effet photoélectrique

➤ Idées mal acceptées jusqu'aux travaux expérimentaux de Millikan (1915, effet photoélectrique).

➤ Einstein prix Nobel (1922) pour l'effet photoélectrique



Comment réconcilier le modèle corpusculaire avec les phénomènes de diffraction, interférence, polarisation? Onde ou particule?

La dualité onde-particule (Louis de Broglie, 1925)

La lumière est à la fois une onde (capable d'interférer, d'être diffractée) et un ensemble de particules possédant une énergie, une quantité de mouvement...

... et de même les particules comme les électrons se comportent aussi comme des ondes (diffraction, interférences).



La dualité onde-particule (Louis de Broglie, 1925)

La lumière est à la fois une onde (capable d'interférer, d'être diffractée) et un ensemble de particules possédant une énergie, une quantité de mouvement...

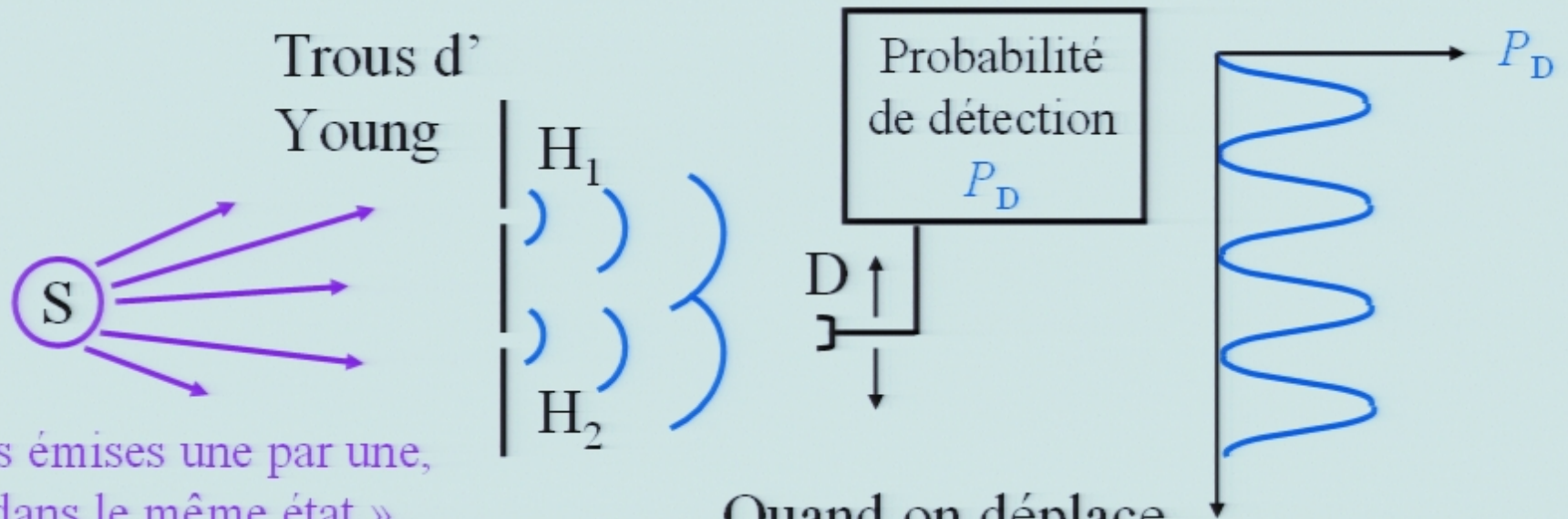
... et de même les particules comme les électrons se comportent aussi comme des ondes (diffraction, interférences).



Facile à énoncer, mais très difficile à se représenter par des images issues du monde accessible à nos sens.

La dualité onde-particule dans les livres

comportement ondulatoire pour les particules

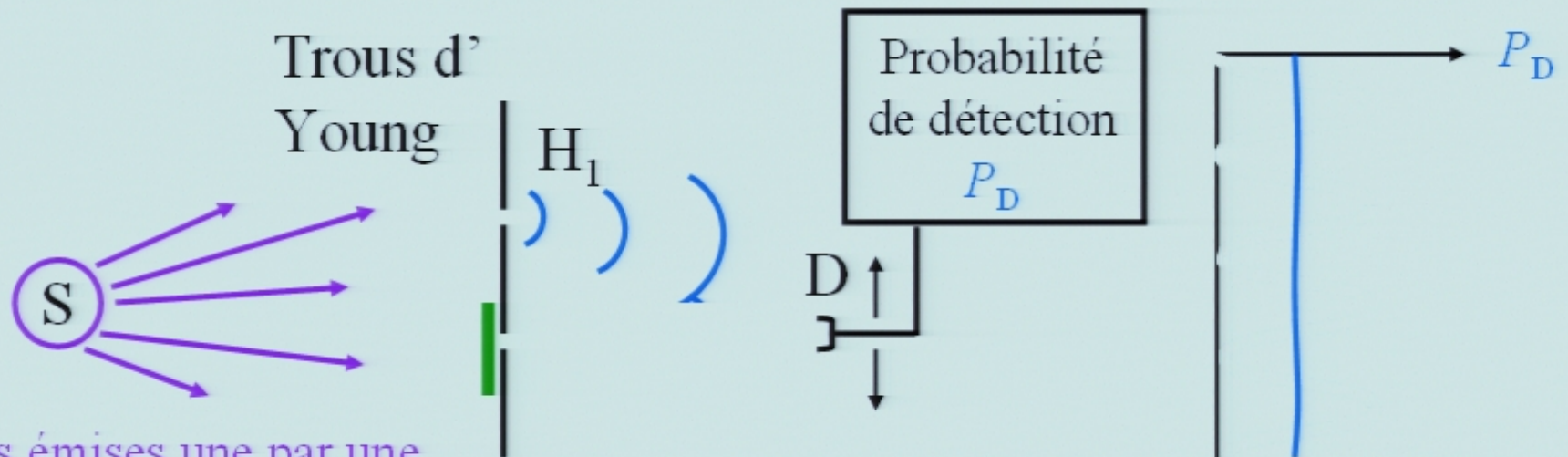


Particules émises une par une,
toutes « dans le même état »
(émission à partir d'un même
point source, direction
aléatoire, énergie déterminée)

Quand on déplace
le détecteur D, P_D est modulé

La dualité onde-particule dans les livres

comportement ondulatoire pour les particules



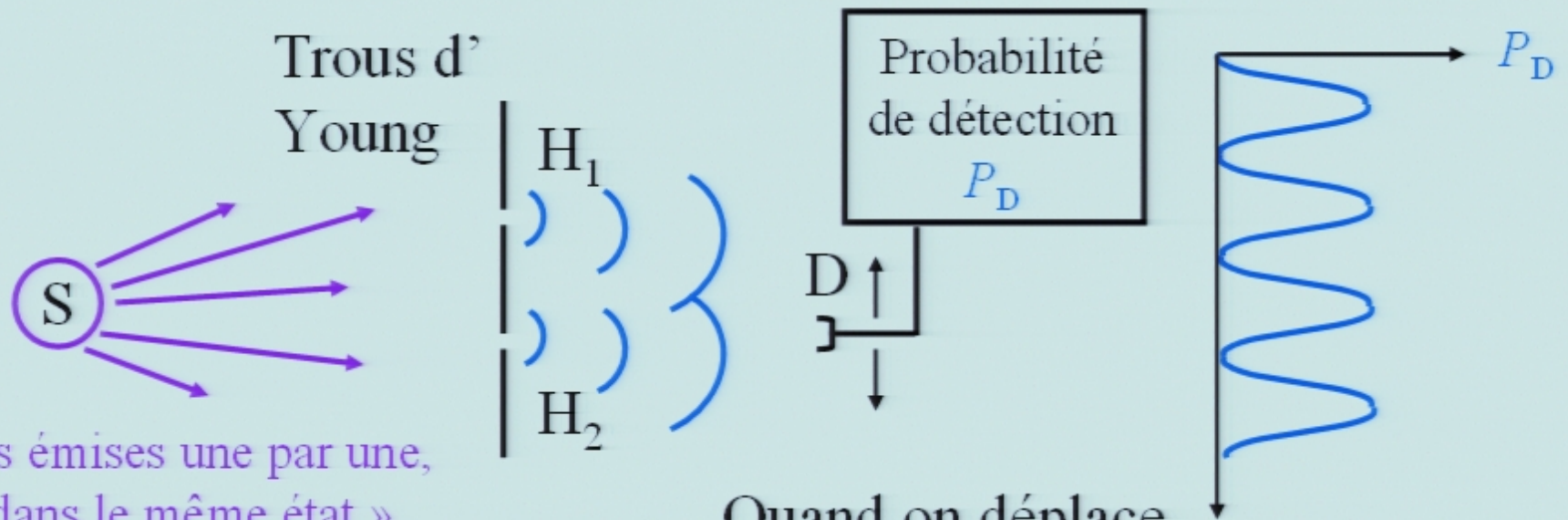
Particules émises une par une,
toutes « dans le même état »
(émission à partir d'un même
point source, direction
aléatoire, énergie déterminée)

Quand on déplace
le détecteur D, P_D est modulé

Si un trou est fermé, pas de
modulation (P_D constant)

La dualité onde-particule dans les livres

comportement ondulatoire pour les particules



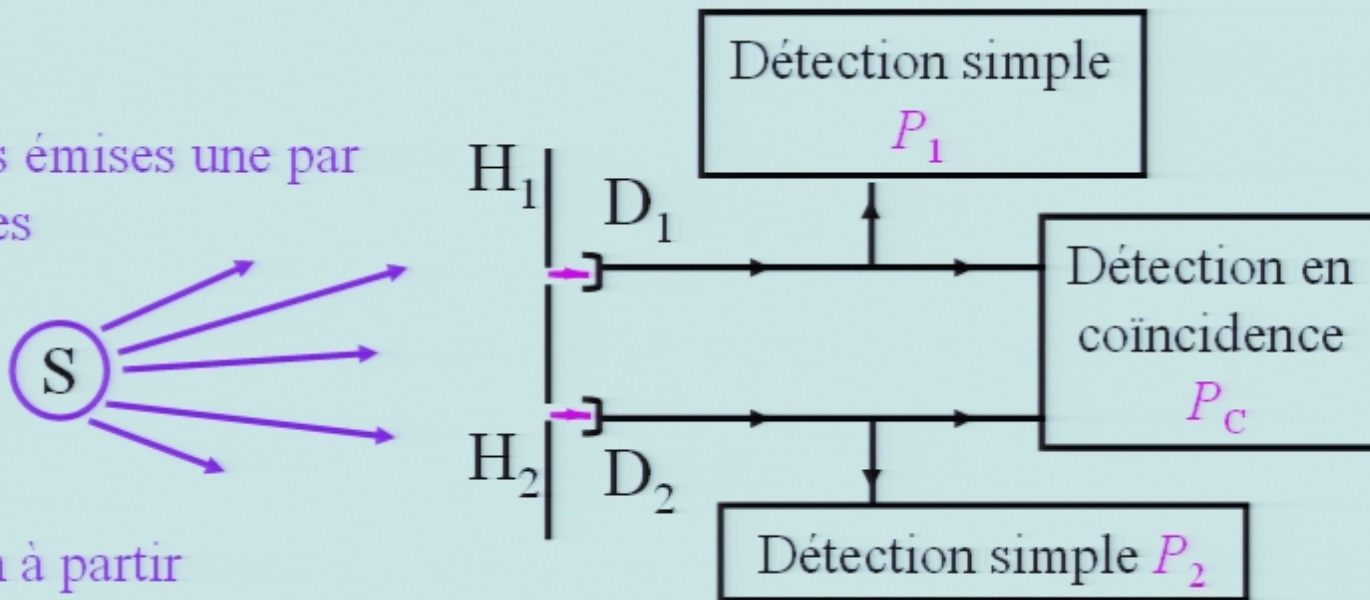
Particules émises une par une,
toutes « dans le même état »
(émission à partir d'un même
point source, direction
aléatoire, énergie déterminée)

Interprétation: **chaque particule** décrite par une onde qui **passe par les deux trous à la fois** et se recombine sur le détecteur.

La dualité onde-particule

comportement corpusculaire

Particules émises une par une, toutes « dans le même état » (émission à partir d'un même point source, direction aléatoire, énergie déterminée)

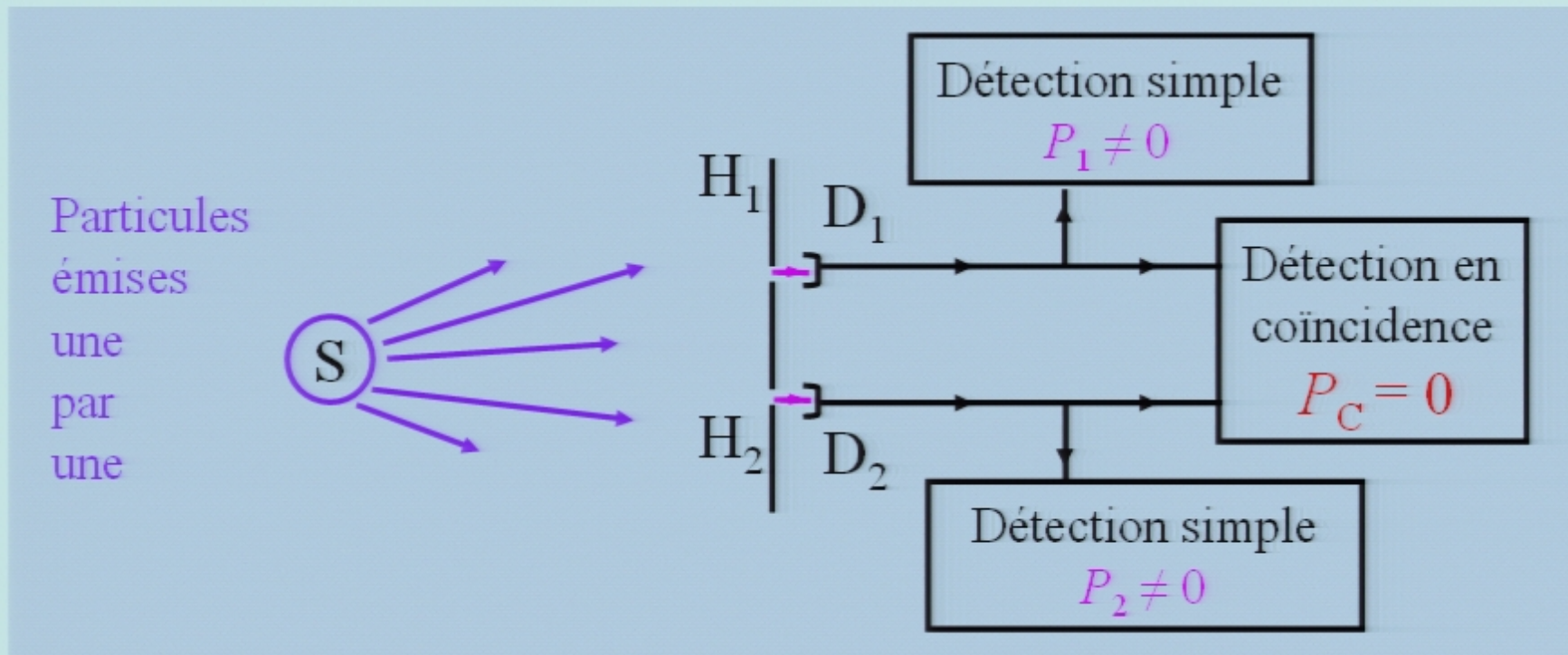


D_1 et D_2 déclenchés aléatoirement, taux moyen constant, mais pas de coïncidence ($P_c = 0$): **anticorrélation**

Interprétation: une particule unique passe soit à travers le trou H_1 , soit à travers le trou H_2 , pas les deux à la fois.

Une particule unique ne se divise pas.

Test du comportement corpusculaire?



Expérience pas faite ainsi jusqu'en 1985

- Caractère corpusculaire « évident » pour électrons, neutrons, atomes, molécules: observation d'effets ondulatoires
- Lumière très atténuée: distance moyenne entre photons grande devant dimension de l'interféromètre: observation d'effets ondulatoires en lumière très atténuée

Comportement ondulatoire avec lumière très atténuée

Comportement
ondulatoire

Taylor	1906	Diffraction	Plaque photo	Oui
Dempster & Batho	1927	Réseau, Fabry-Perot	Plaque photo	Oui
Tanossy and Naray	1957	Interféro. de Michelson	Photomultiplicateur	Oui
Griffiths	1963	Fentes d' Young	Intensificateur	Oui
Dontsov & Baz	1967	Fabry-Perot	Intensificateur	NON
Scarl et al.	1968	Fentes d' Young	Photomultiplicateur	Oui
Reynolds et al.	1969	Fabry-Perot	Intensificateur	Oui
Bozec et al.	1969	Fabry-Perot	Plaque photo	Oui
Grishaev et al.	1971	Interféro. de Jamin	Intensificateur	Oui
Zajonc et al.	1984	Interféro. à fibre; choix retardé	Photomultiplicateur	Oui
Alley et al.	1985	Interféro. à fibre; choix retardé	Photomultiplicateur	Oui

Une question réglée ?

Remise en cause du caractère corpusculaire de la lumière très atténuée

Propriétés de l'effet photoélectrique parfaitement interprétées par le modèle semi-classique de la photodétection (1964)

- Détecteur quantique (atome, molécule, solide conducteur, ...)
- Lumière : onde électromagnétique classique

NB: en 1905 (huit ans avant l'atome de Bohr) pas de description quantique, ni pour la matière, ni pour la lumière: effet photoélectrique incompréhensible dans le cadre classique. Einstein a choisi de quantifier la lumière. Il aurait pu choisir de quantifier la matière.

Remise en cause du caractère corpusculaire de la lumière très atténuée

Propriétés de l'effet photoélectrique parfaitement interprétées par le modèle semi-classique de la photodétection (1964)

- Détecteur quantique (atome, molécule, solide conducteur, ...)
- Lumière : onde électromagnétique classique

NB: en 1905 (huit ans avant l'atome de Bohr) pas de description quantique, ni pour la matière, ni pour la lumière: effet photoélectrique incompréhensible dans le cadre classique. Einstein a choisi de quantifier la lumière. Il aurait pu choisir de quantifier la matière.

Remise en cause du caractère corpusculaire de la lumière très atténuée

Propriétés de l'effet photoélectrique parfaitement interprétées par le modèle semi-classique de la photodétection (1964)

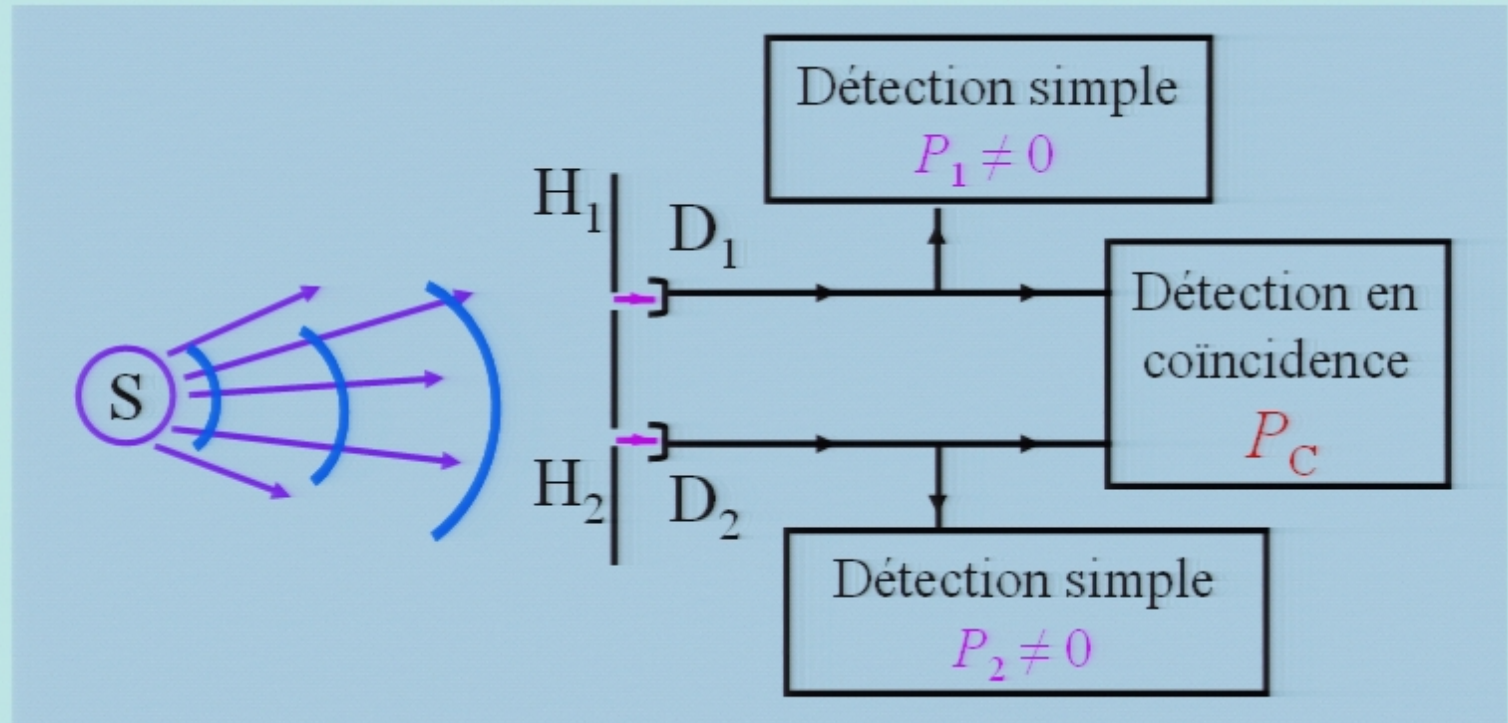
- Détecteur quantique (atome, molécule, solide conducteur, ...)
- Lumière : onde électromagnétique classique

NB: en 1905 (huit ans avant l'atome de Bohr) pas de description quantique, ni pour la matière, ni pour la lumière: effet photoélectrique incompréhensible dans le cadre classique. Einstein a choisi de quantifier la lumière. Il aurait pu choisir de quantifier la matière.

Critère quantitatif de comportement corpusculaire (AA, Philippe Grangier, 1985)

Particule: on attend $P_c = 0$

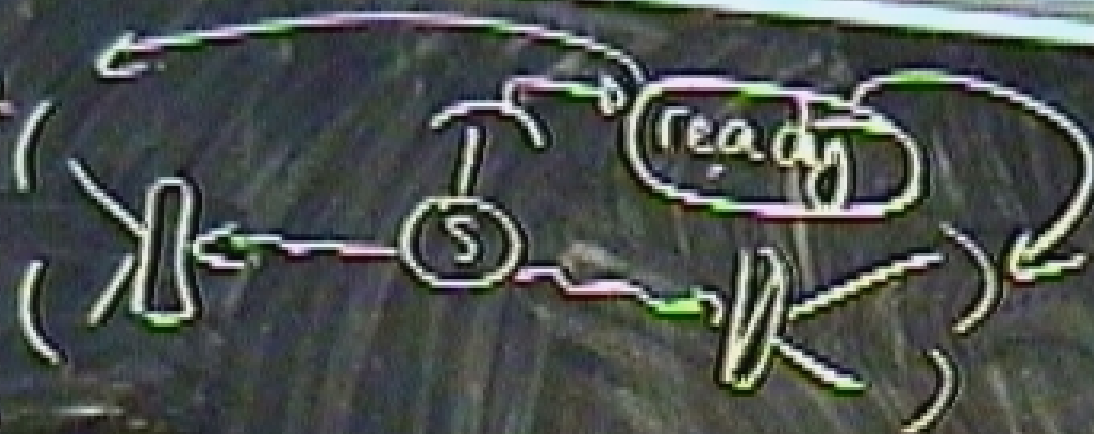
Onde: passe par les deux trous:
on attend $P_c \neq 0$



Plus précisément, pour une onde, on attend $\alpha = \frac{P_c}{P_1 P_2} \geq 1$

Critère de comportement corpusculaire: $\alpha = \frac{P_c}{P_1 P_2} < 1$

bright line



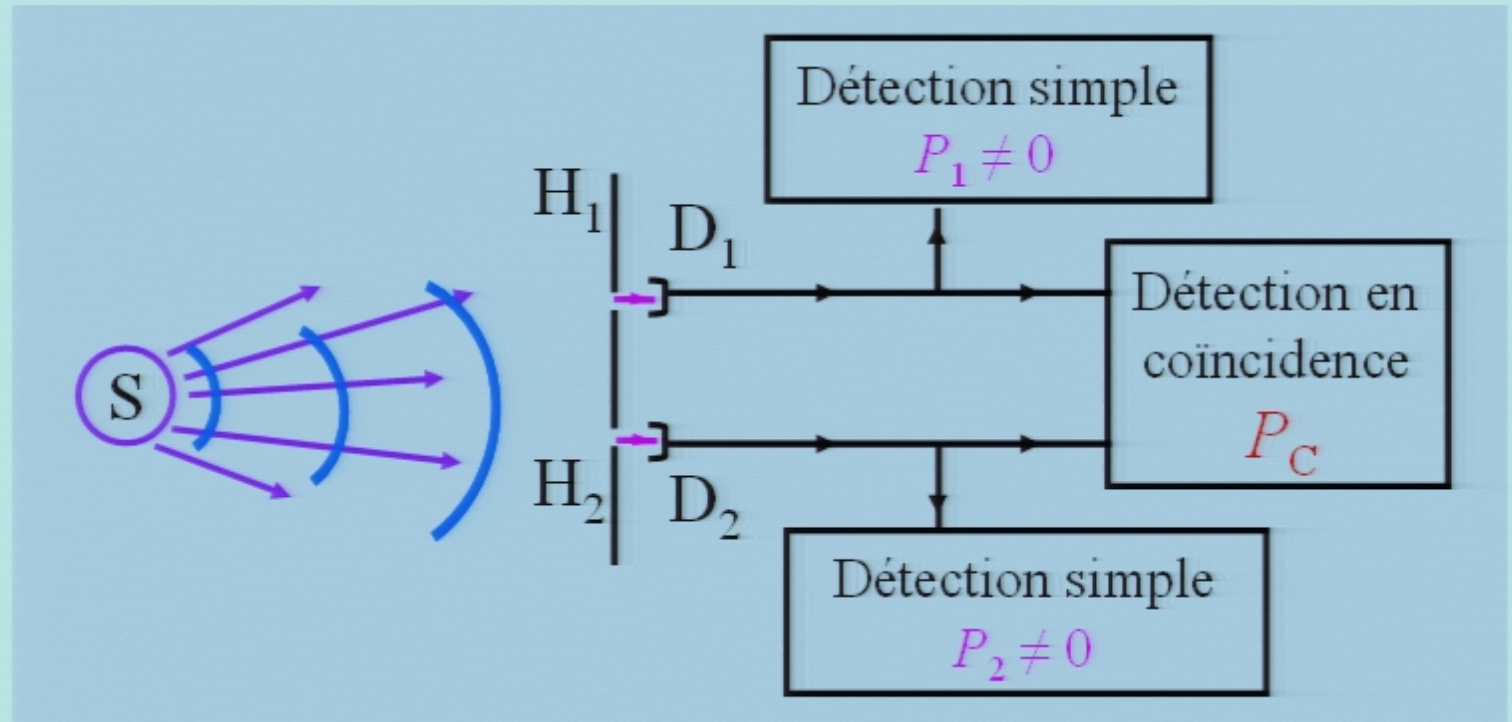
$$P(1) = \epsilon$$

$$P(2) = \frac{\epsilon^2}{\sqrt{2}}$$

Critère quantitatif de comportement corpusculaire (AA, Philippe Grangier, 1985)

Particule: on attend $P_c = 0$

Onde: passe par les deux trous: on attend $P_c \neq 0$

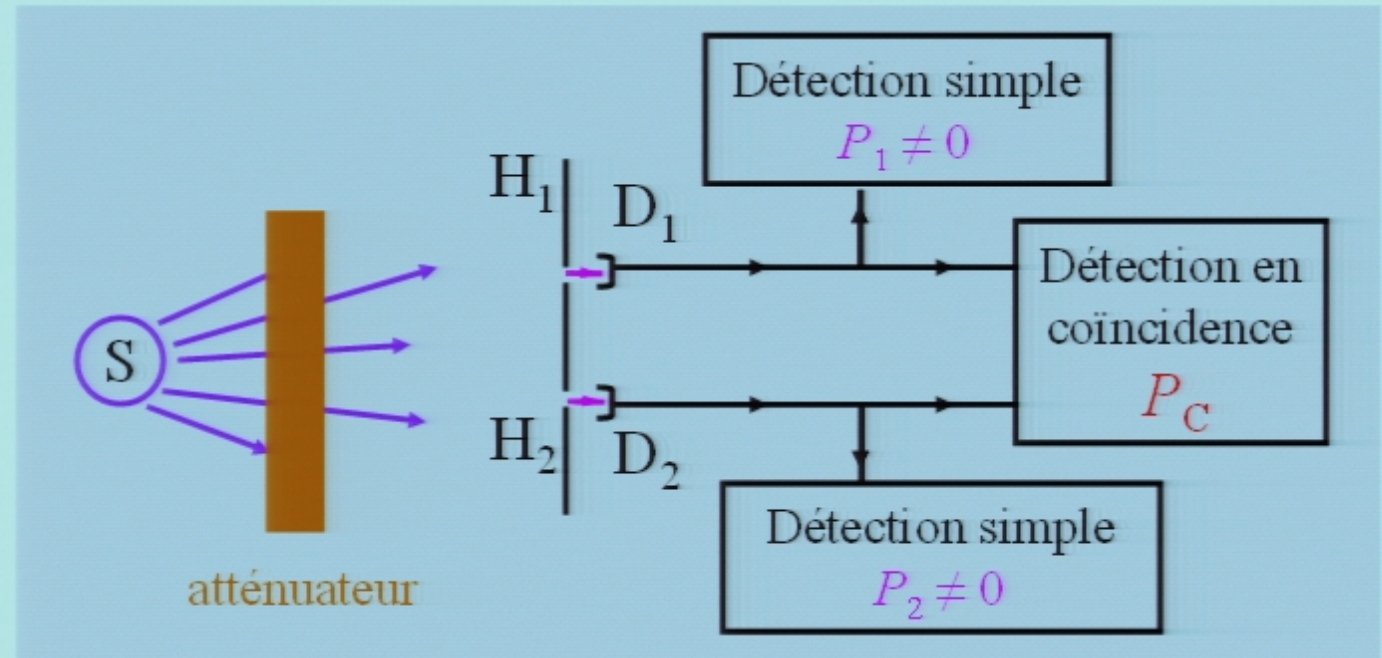


Plus précisément, pour une onde, on attend $\alpha = \frac{P_c}{P_1 P_2} \geq 1$

Critère de comportement corpusculaire: $\alpha = \frac{P_c}{P_1 P_2} < 1$

La lumière très atténuée n'a pas un comportement de particules (AA, Philippe Grangier, 1985)

Impulsions émises
par une diode
électroluminescente
et très atténuées:
0,01 photon par
impulsion, en
moyenne



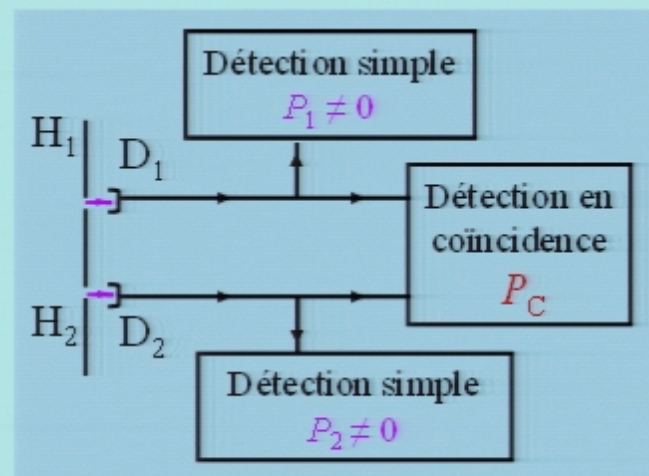
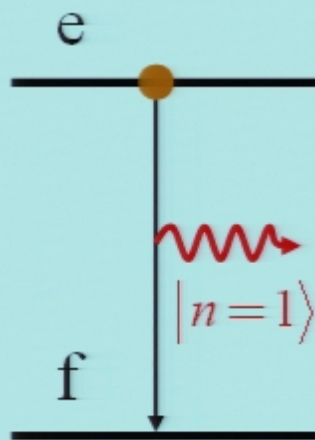
Résultat expérimental: $\alpha_{\text{meas}} = 1.07 \pm 0.08$ Comportement ondulatoire

En accord avec les prédictions de la théorie quantique de la lumière.
Lumière très atténuée décrite comme un état quasi-classique.

Source de photons uniques

La théorie quantique de la lumière permet de concevoir des sources de photons uniques ($|n=1\rangle$) pour lesquels on prévoit un comportement corpusculaire:

Atome isolé excité
Émet un photon et un seul



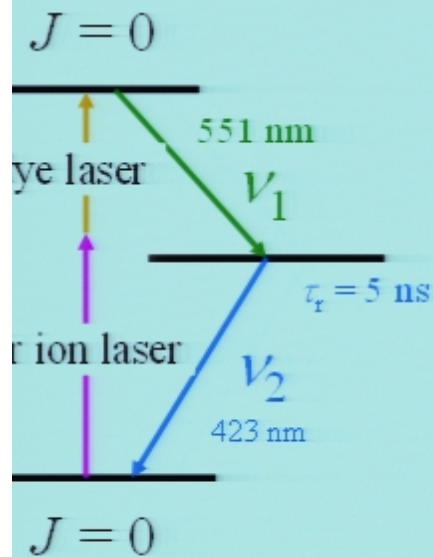
Un photon unique ne peut pas être détecté deux fois

$$P_c = 0$$

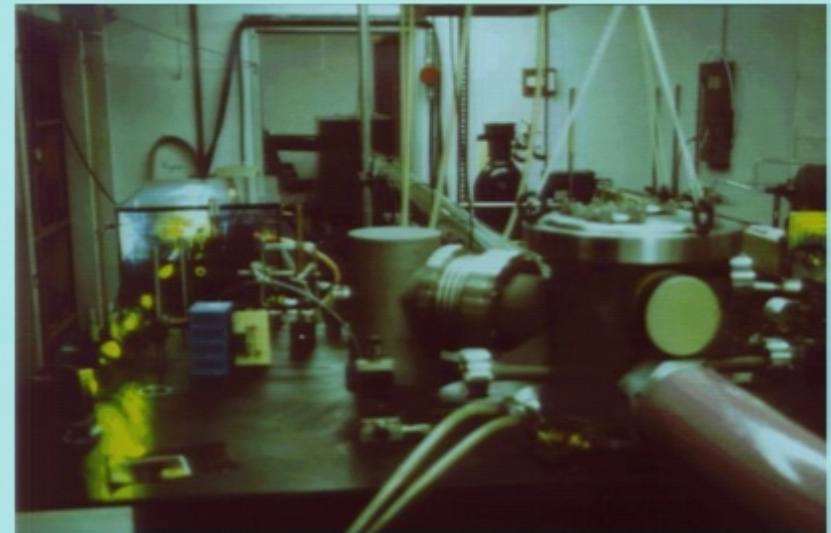
$$\Rightarrow \alpha < 1$$

Dans les sources classiques (lampe à incandescence, lampe fluorescente, laser) un très grands nombre d'atomes sont excités simultanément. Comment isoler un seul atome excité?

La première source de photons uniques (AA, Philippe Grangier, 1985)



Cascade radiative atomique. **Atome unique isolé temporellement:** pendant les 5 ns suivant la détection de ν_1 un seul atome est prêt à émettre un photon ν_2 .



Résultat expérimental:

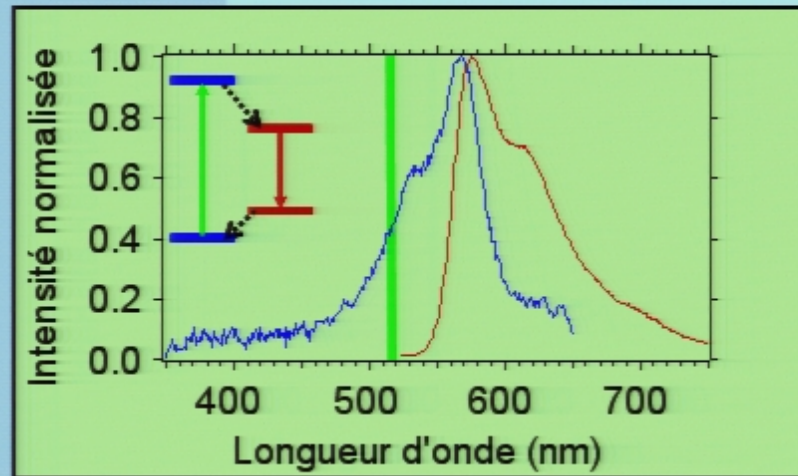
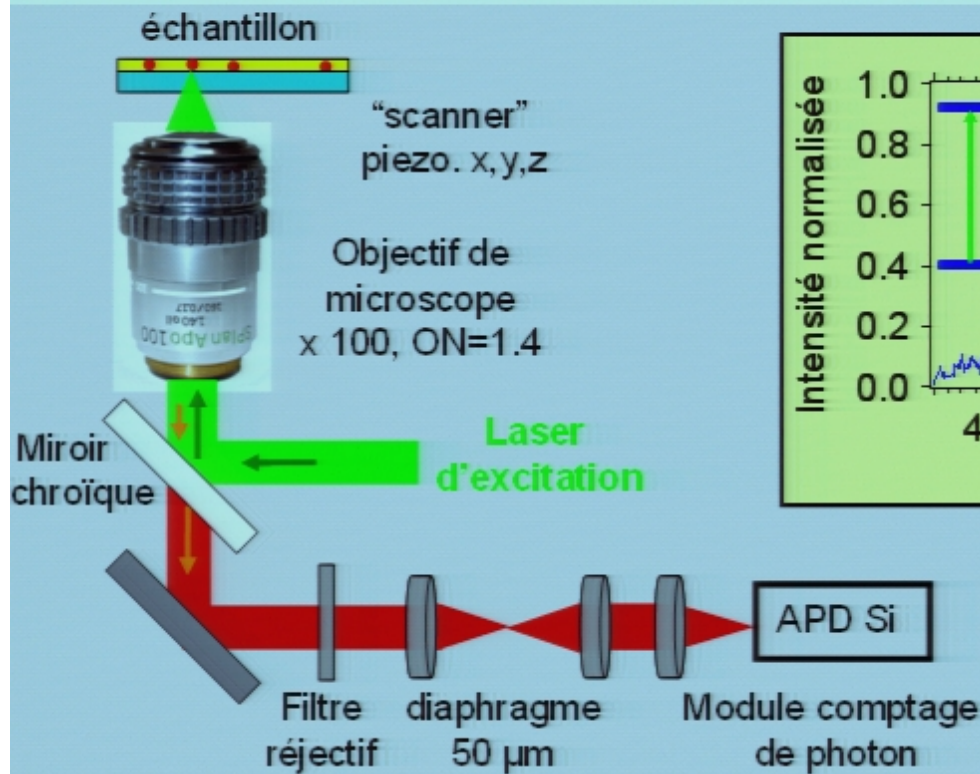
$$\alpha_{\text{meas}} = 0.18 \pm 0.06$$

Anticorrélation ($\alpha < 1$)

Comportement corpusculaire

Sources modernes: photons uniques « à la demande »

Molécule unique isolée spatialement (microscopie confocale)



Résultat expérimental:

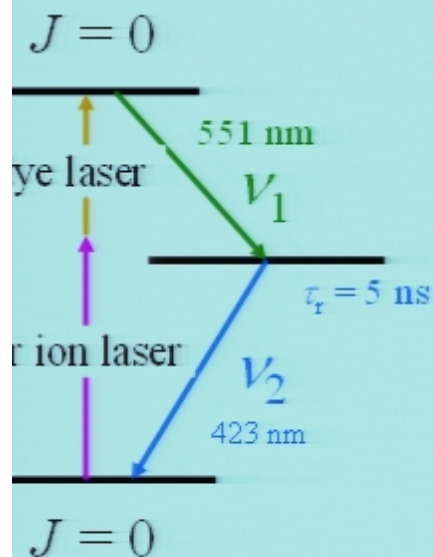
$$\alpha_{\text{meas}} = 0.132 \pm 0.001$$

Anticorrélation ($\alpha < 1$)

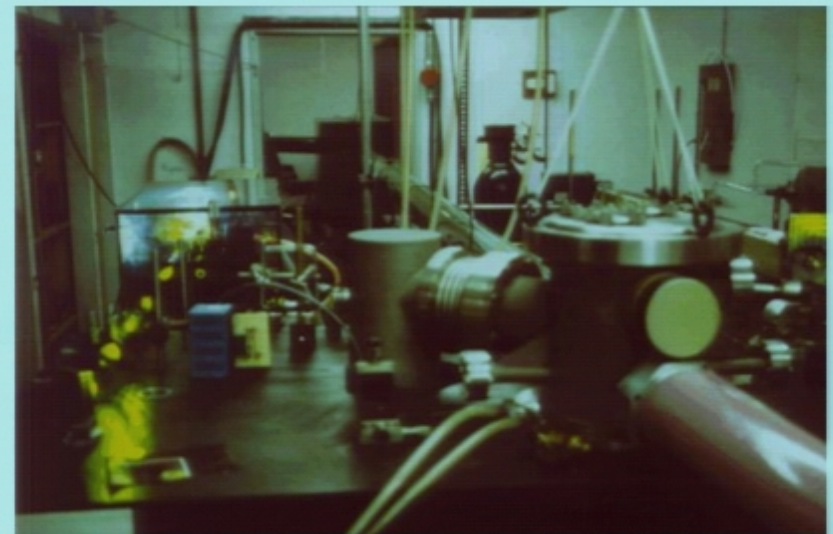
Comportement corpusculaire

Données communiquées par
Pirsa: 05030114
J. F. Roch (LPQM, ENS Cachan)

La première source de photons uniques (AA, Philippe Grangier, 1985)



Cascade radiative atomique. **Atome unique isolé temporellement:** pendant les 5 ns suivant la détection de ν_1 un seul atome est prêt à émettre un photon ν_2 .



Résultat expérimental:

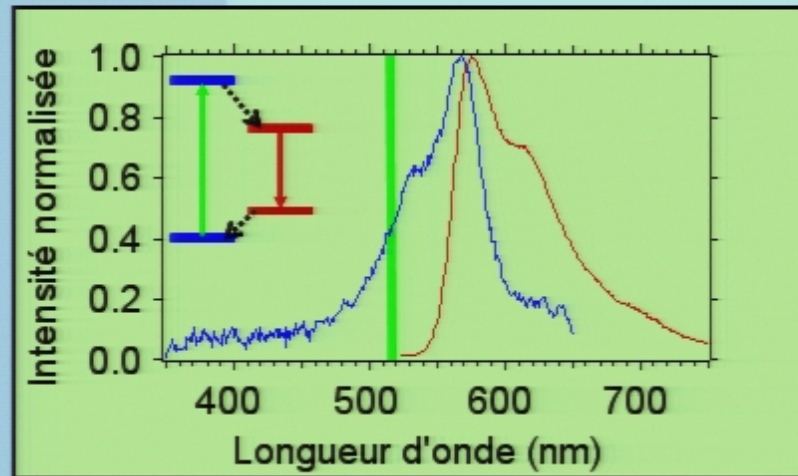
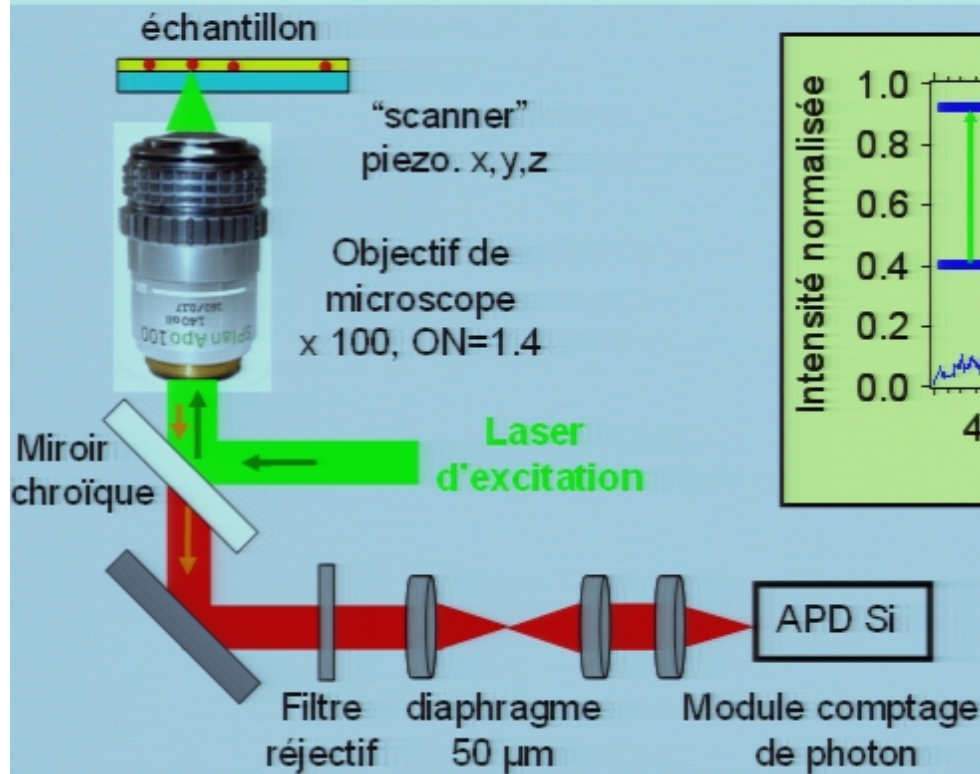
$$\alpha_{\text{meas}} = 0.18 \pm 0.06$$

Anticorrélation ($\alpha < 1$)

Comportement corpusculaire

Sources modernes: photons uniques « à la demande »

Molécule unique isolée spatialement (microscopie confocale)



Résultat expérimental:

$$\alpha_{\text{meas}} = 0.132 \pm 0.001$$

Anticorrélation ($\alpha < 1$)

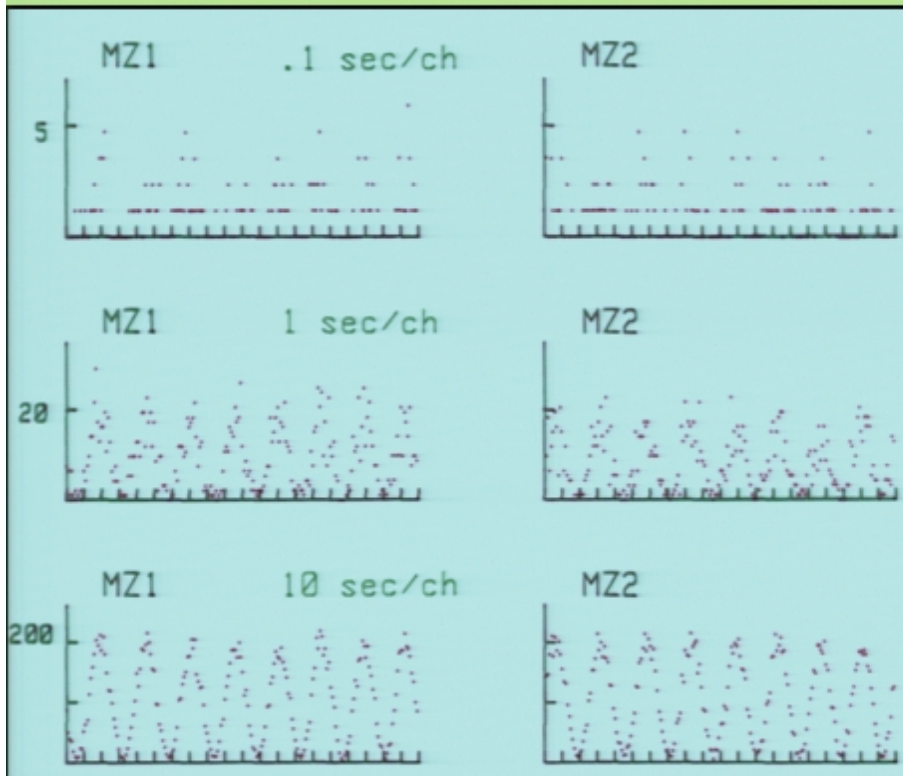
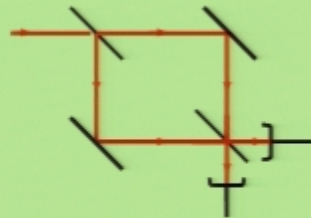
Comportement corpusculaire

Données communiquées par
Pirsa: 05030114
J. F. Roch (LPQM, ENS Cachan)

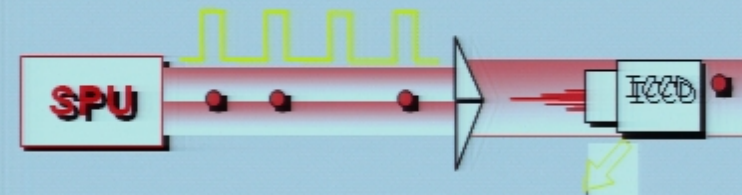
Interférences avec un photon unique

Interféromètre éclairé par une source de photons uniques ($\alpha < 1$ observé)

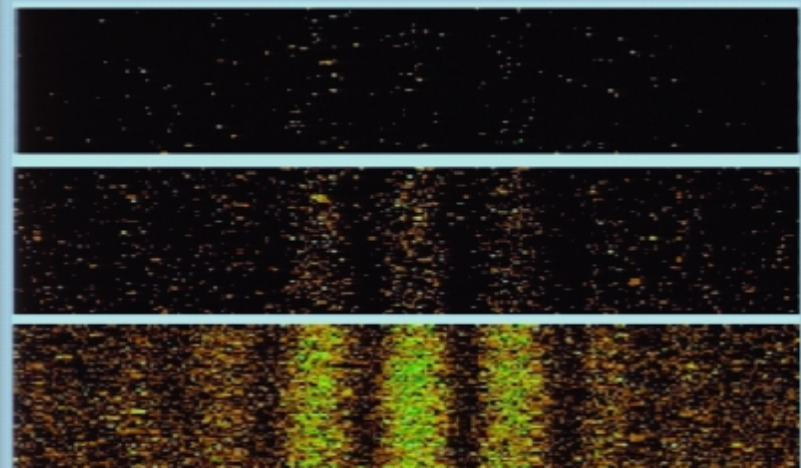
Orsay 1985

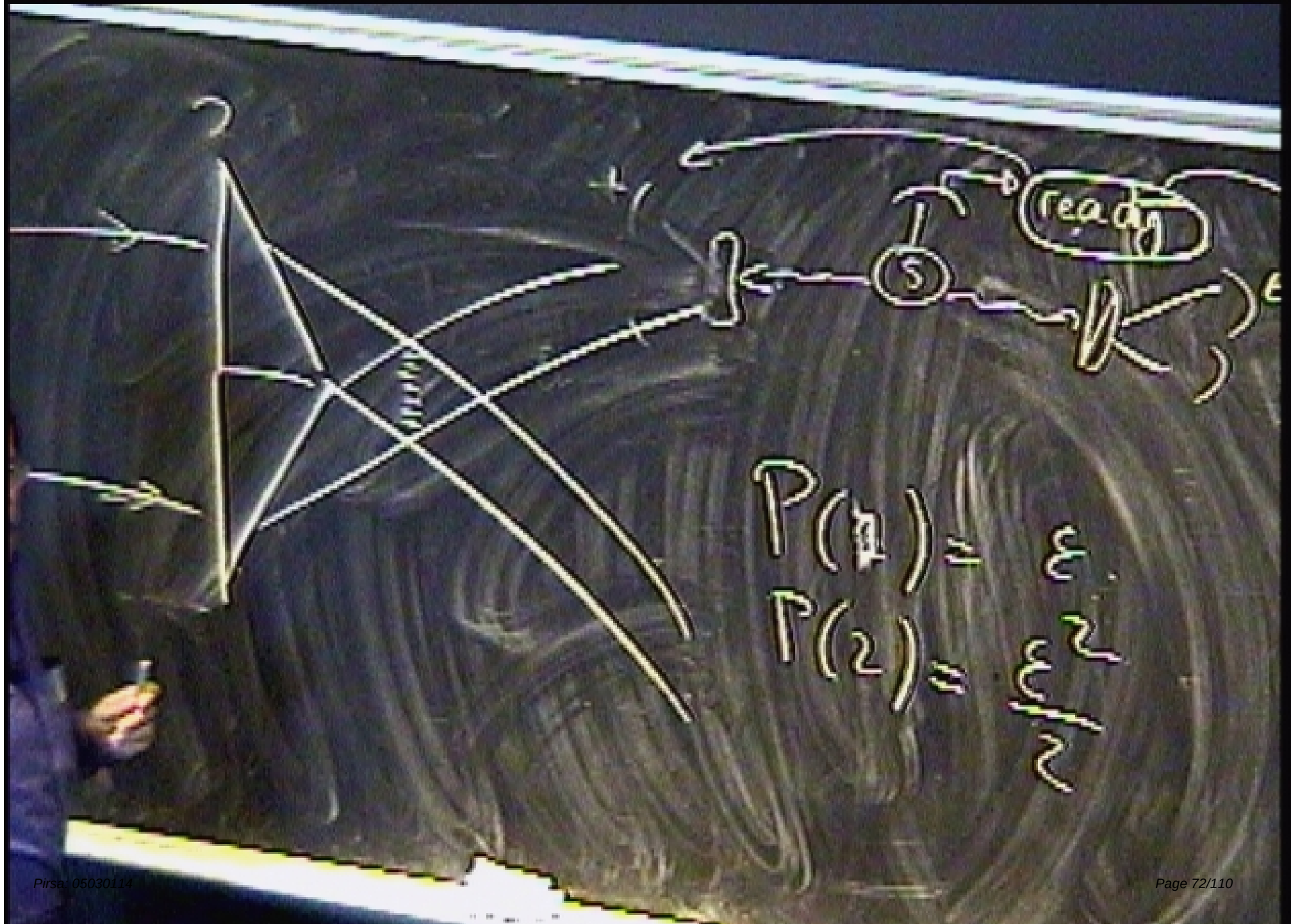


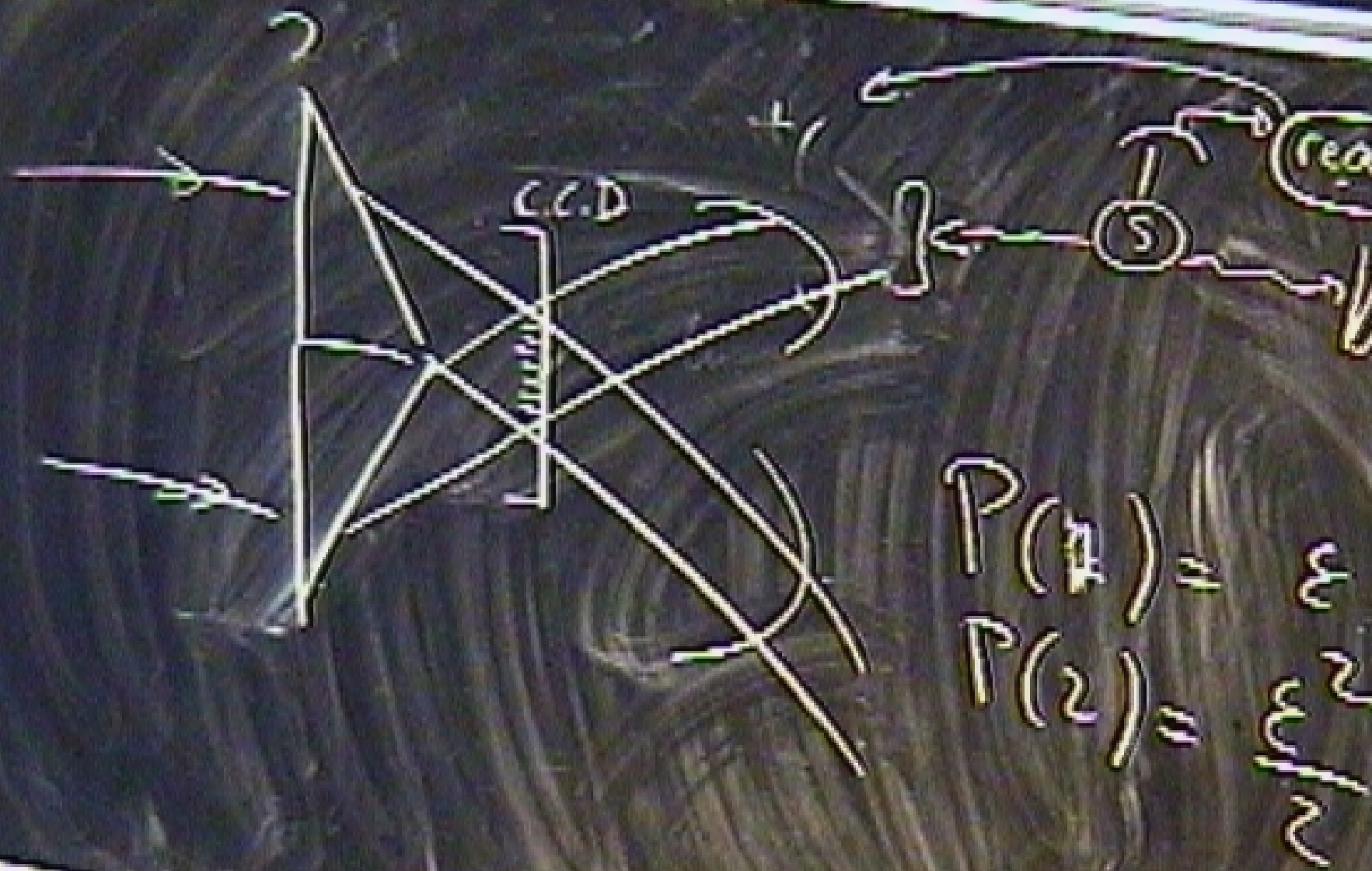
Cachan 2005

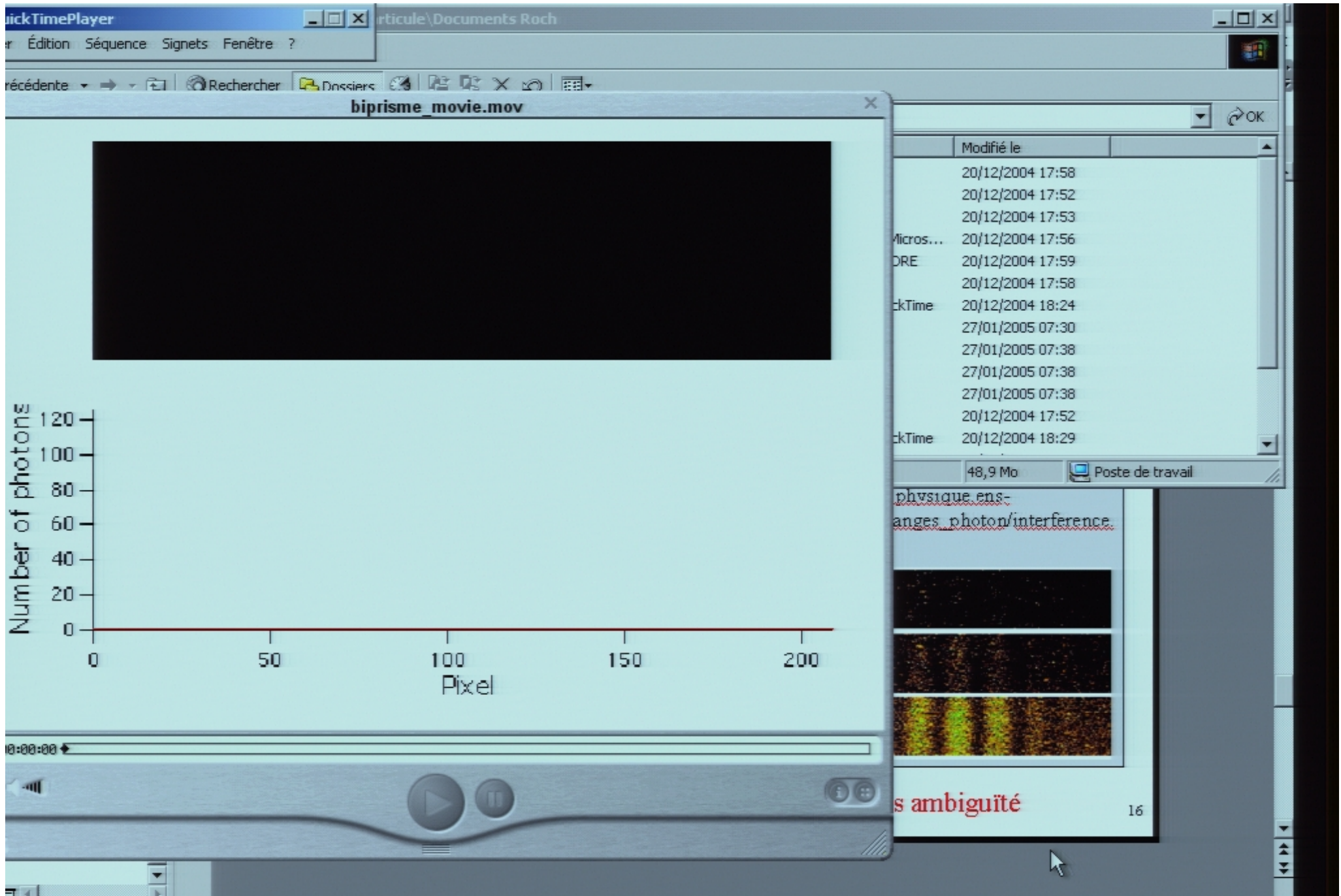


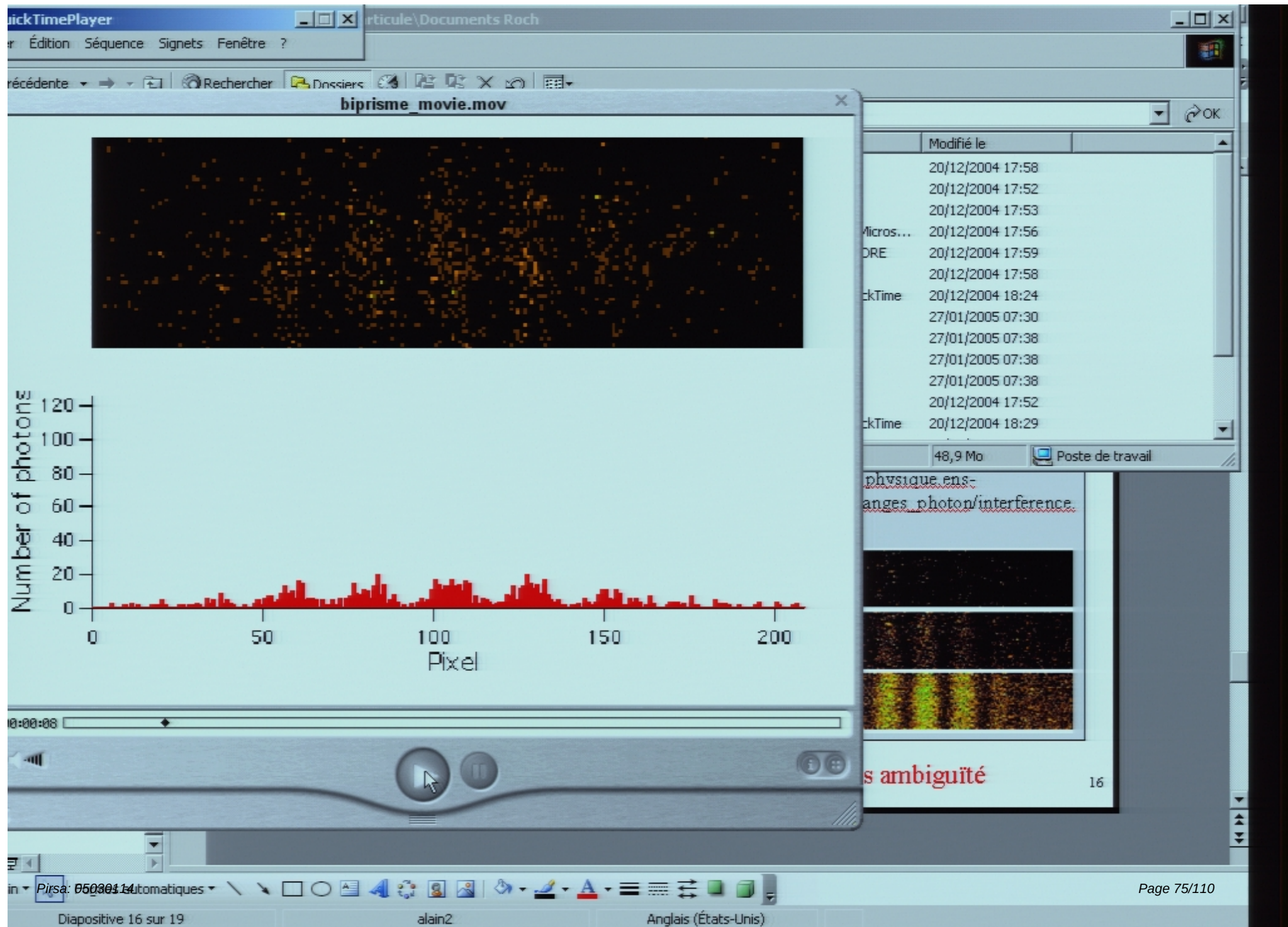
Voir les franges se construire
http://www.physique.ens-cachan.fr/franges_photon/interference.htm









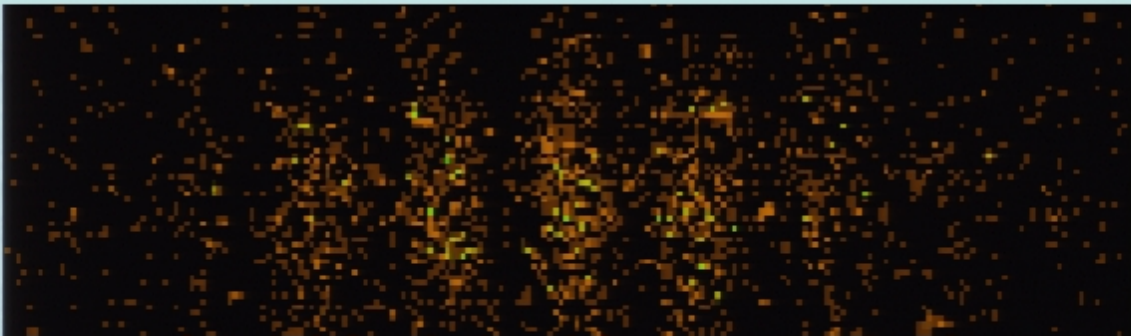


QuickTimePlayer

Édition Séquence Signets Fenêtre ?

Précédente → Recherche Documents

biprisme_movie.mov

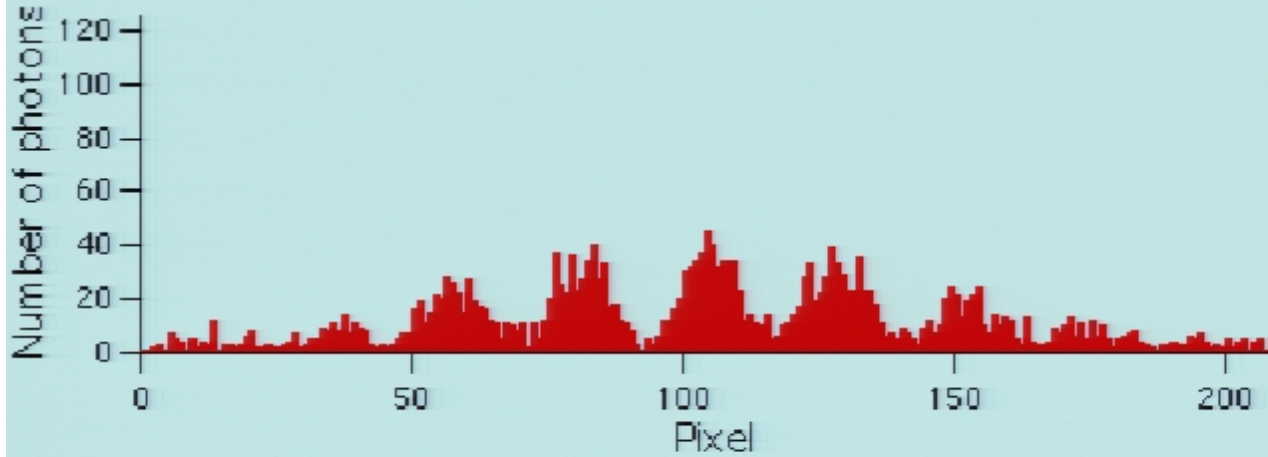


Number of photons

120
100
80
60
40
20
0

0 50 100 150 200

Pixel



00:00:22

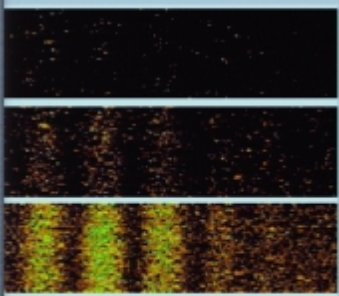


OK

Modifié le
20/12/2004 17:58
20/12/2004 17:52
20/12/2004 17:53
Micros... 20/12/2004 17:56
DRE 20/12/2004 17:59
20/12/2004 17:58
ckTime 20/12/2004 18:24
27/01/2005 07:30
27/01/2005 07:38
27/01/2005 07:38
27/01/2005 07:38
20/12/2004 17:52
ckTime 20/12/2004 18:29

48,9 Mo Poste de travail

physique ens-
anges photon/interference



s ambiguïté

16

Pirsa: 05030114 Automatiques

Diapositive 16 sur 19

alain2

Anglais (États-Unis)

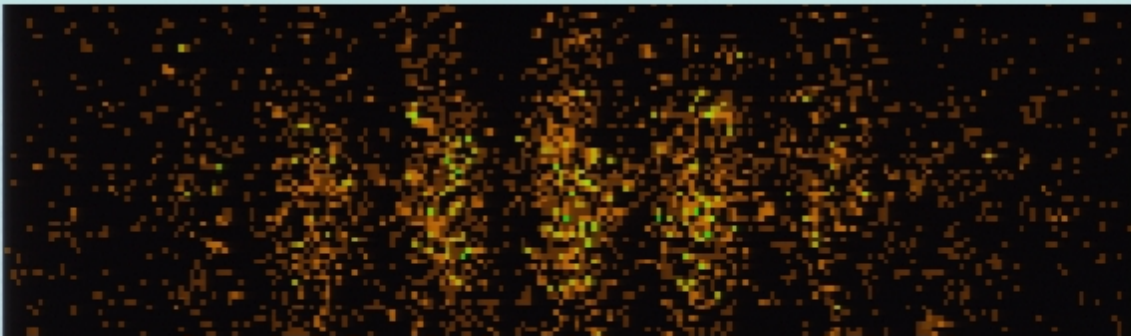
Page 76/110

QuickTimePlayer

Édition Séquence Signets Fenêtre ?

Précédente → Recherche Documents

biprisme_movie.mov

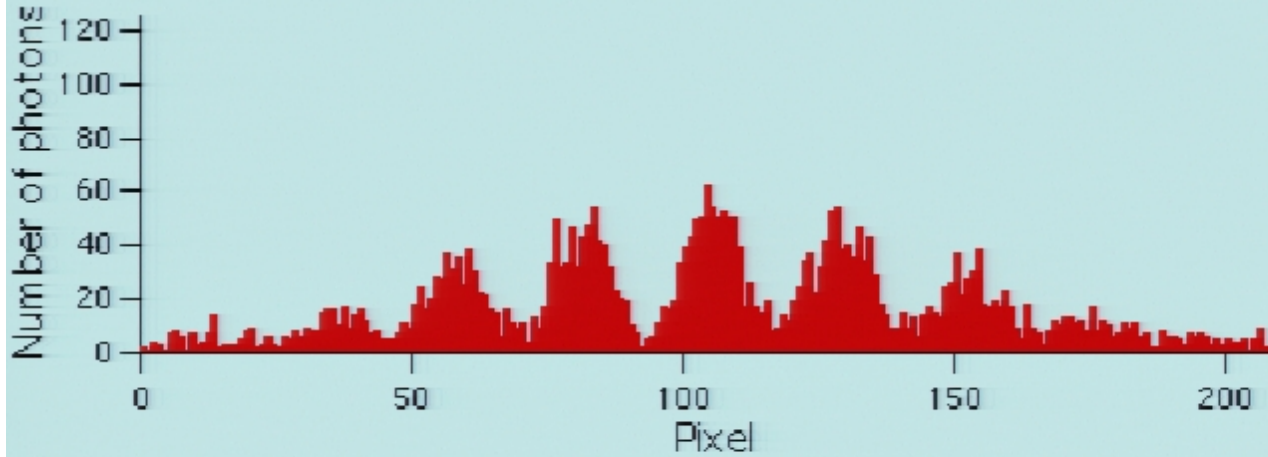


Number of photons

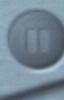
120
100
80
60
40
20
0

0 50 100 150 200

Pixel



00:00:32



OK

Modifié le

20/12/2004 17:58

20/12/2004 17:52

20/12/2004 17:53

Micros... 20/12/2004 17:56

DRE 20/12/2004 17:59

20/12/2004 17:58

ckTime 20/12/2004 18:24

27/01/2005 07:30

27/01/2005 07:38

27/01/2005 07:38

27/01/2005 07:38

20/12/2004 17:52

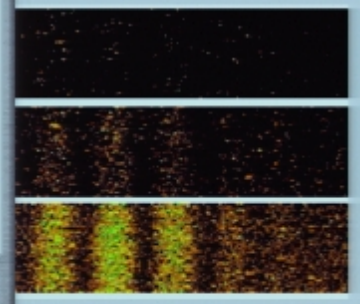
ckTime 20/12/2004 18:29

48,9 Mo

Poste de travail

physique ens-

anges photon/interference



s ambiguïté

16

Pirsa: 05030114 Automatiques

Diapositive 16 sur 19

alain2

Anglais (États-Unis)

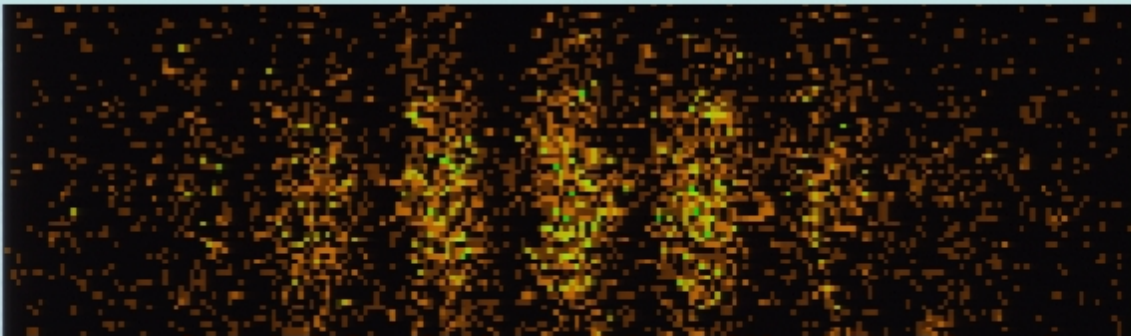
Page 77/110

QuickTimePlayer

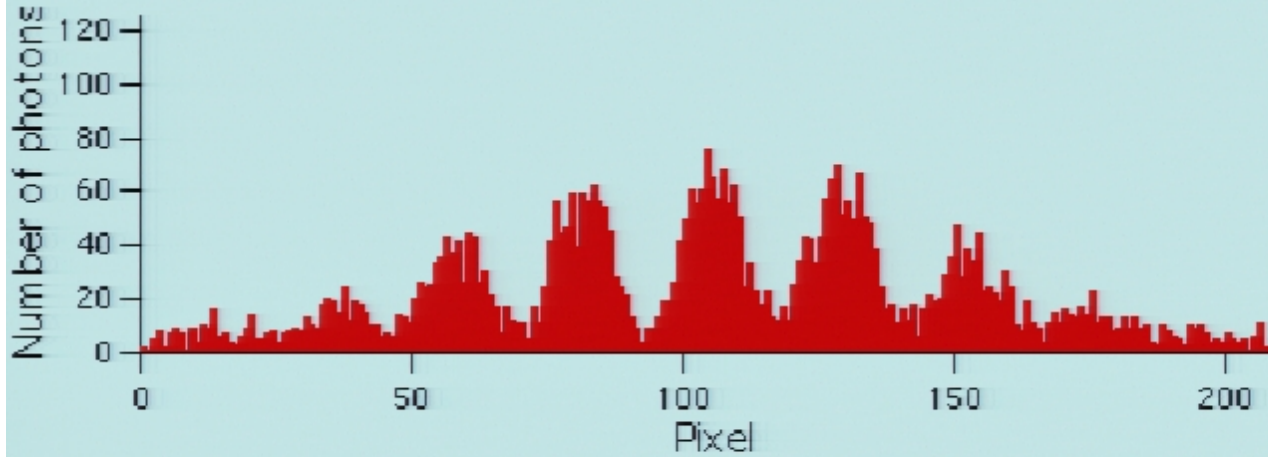
Édition Séquence Signets Fenêtre ?

Précédente → Rechercher Documents

biprisme_movie.mov



Number of photons



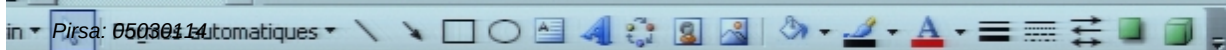
Pixel

00:00:41



in

Pirsa: 05030114 Automatiques



Diapositive 16 sur 19

alain2

Anglais (États-Unis)

OK

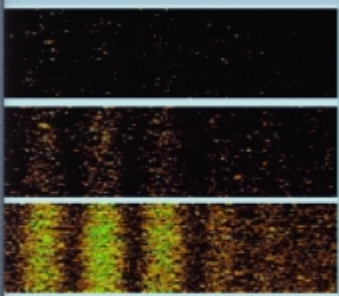
Modifié le

	20/12/2004 17:58
	20/12/2004 17:52
	20/12/2004 17:53
Micros...	20/12/2004 17:56
DRE	20/12/2004 17:59
	20/12/2004 17:58
ckTime	20/12/2004 18:24
	27/01/2005 07:30
	27/01/2005 07:38
	27/01/2005 07:38
	27/01/2005 07:38
	20/12/2004 17:52
ckTime	20/12/2004 18:29

48,9 Mo

Poste de travail

physique ens-
anges photon/interference



s ambiguïté

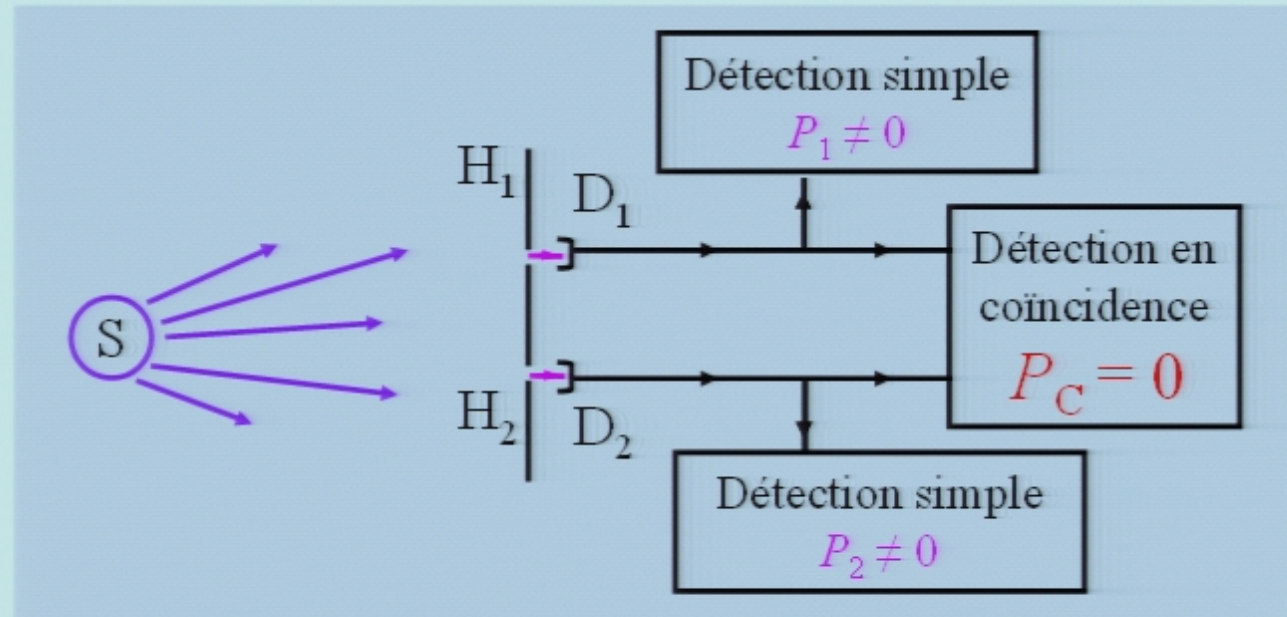
16

Page 78/110

Dualité onde particule: bizarre!

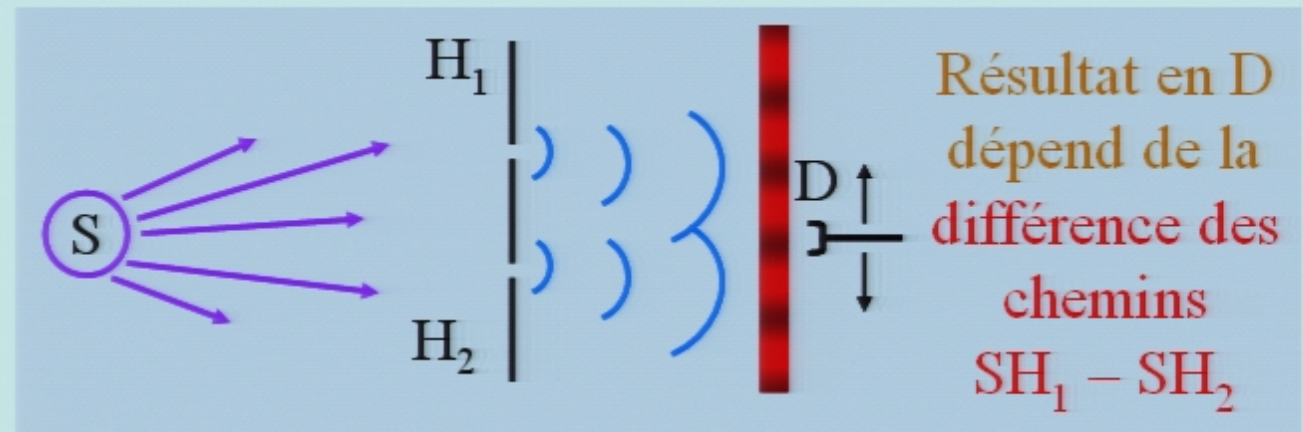
Première expérience

Observation d'un comportement corpusculaire: photon unique passe soit par H_1 soit par H_2 .



Deuxième expérience

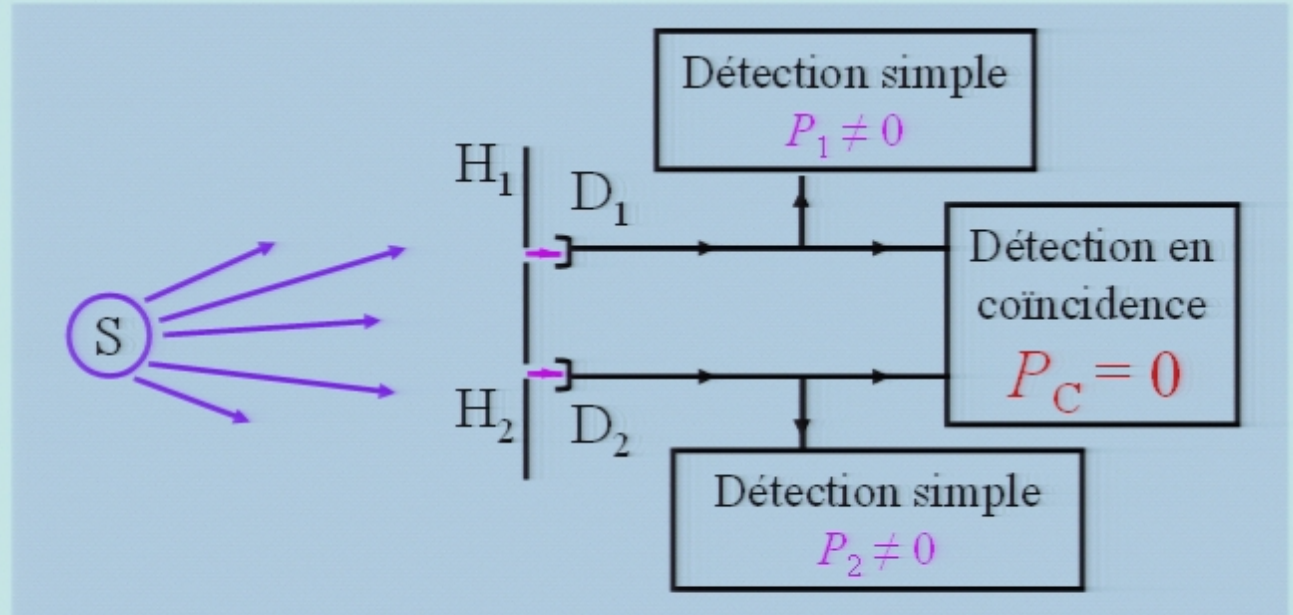
Comportement ondulatoire: photon unique passe par les deux trous à la fois.



Dualité onde particule: bizarre!

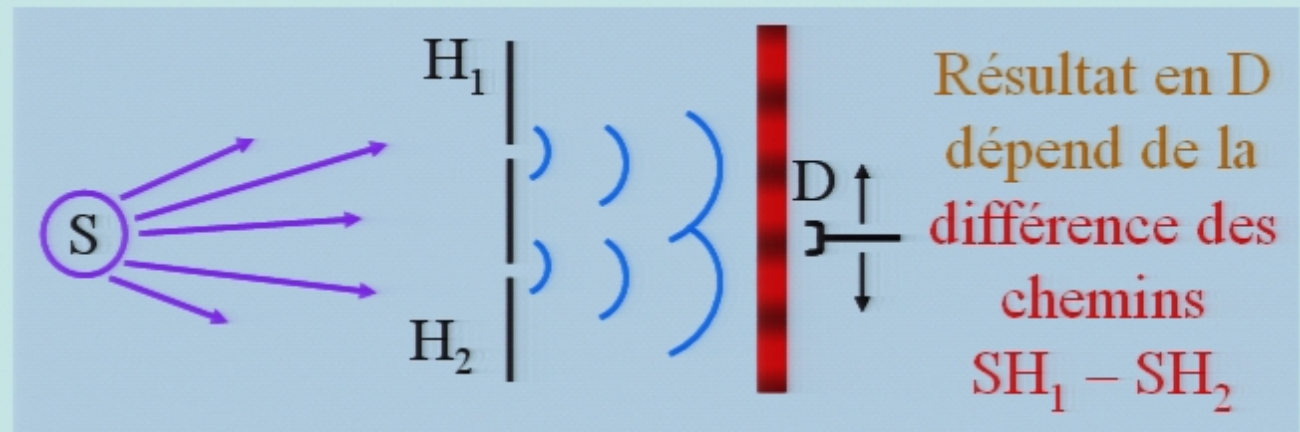
Première expérience

Observation d'un comportement corpusculaire: photon unique passe soit par H_1 soit par H_2 .



Deuxième expérience

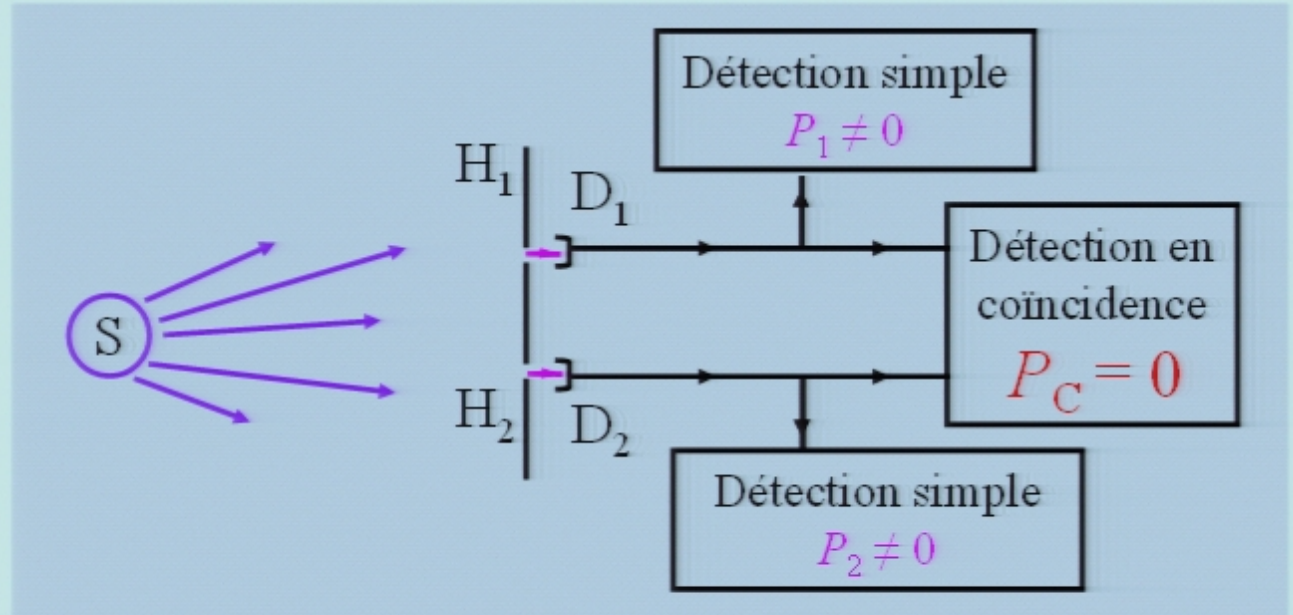
Comportement ondulatoire: photon unique passe par les deux trous à la fois.



Dualité onde particule: bizarre!

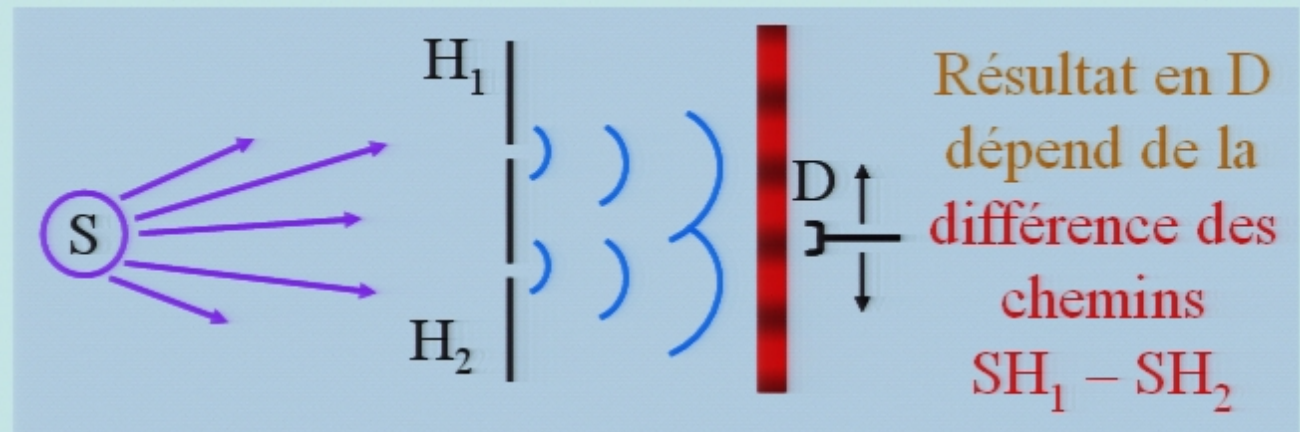
Première expérience

Observation d'un comportement corpusculaire: photon unique passe soit par H_1 soit par H_2 .



Deuxième expérience

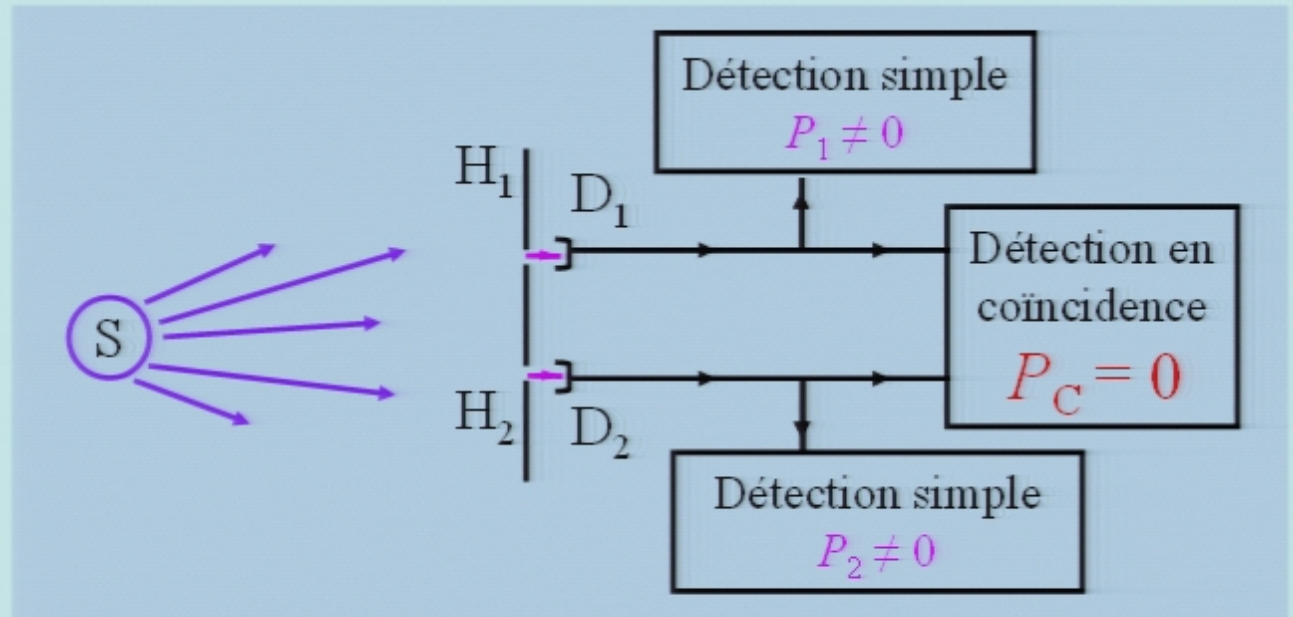
Comportement ondulatoire: photon unique passe par les deux trous à la fois.



Dualité onde particule: bizarre!

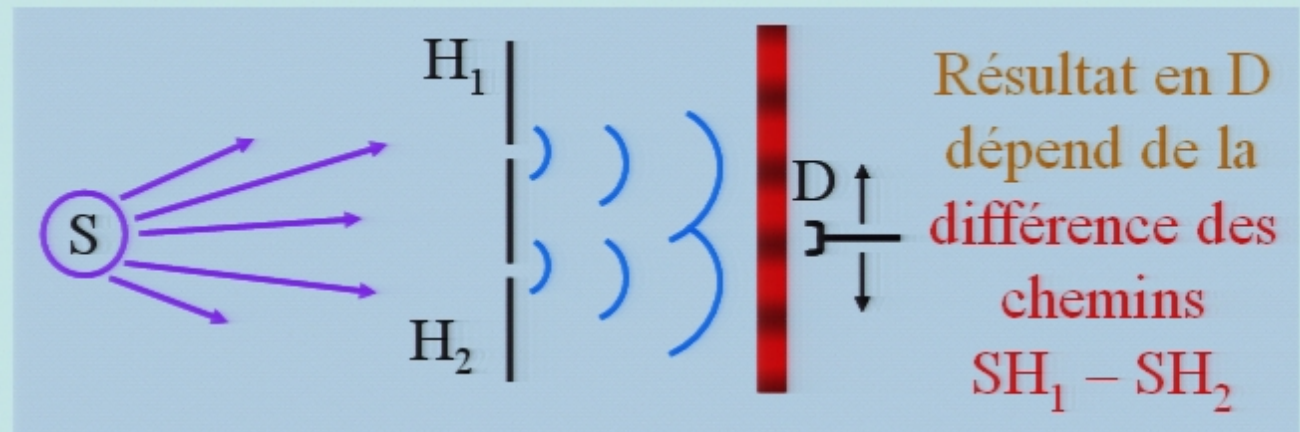
Première expérience

Observation d'un comportement corpusculaire: photon unique passe soit par H_1 soit par H_2 .



Deuxième expérience

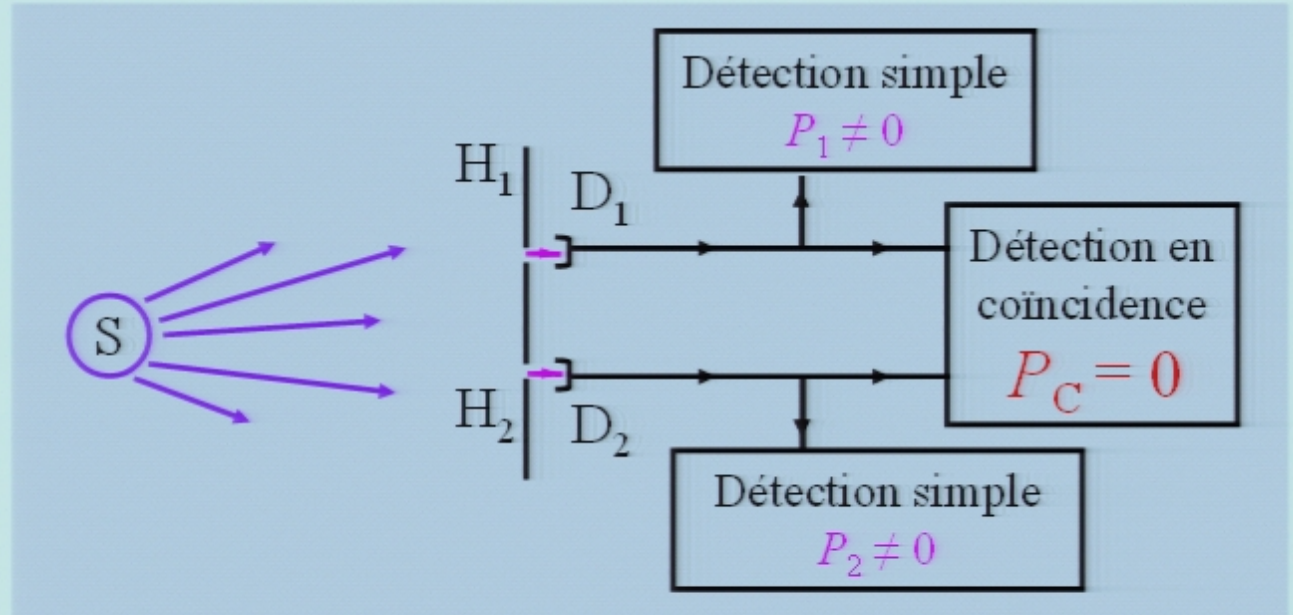
Comportement ondulatoire: photon unique passe par les deux trous à la fois.



Dualité onde particule: bizarre!

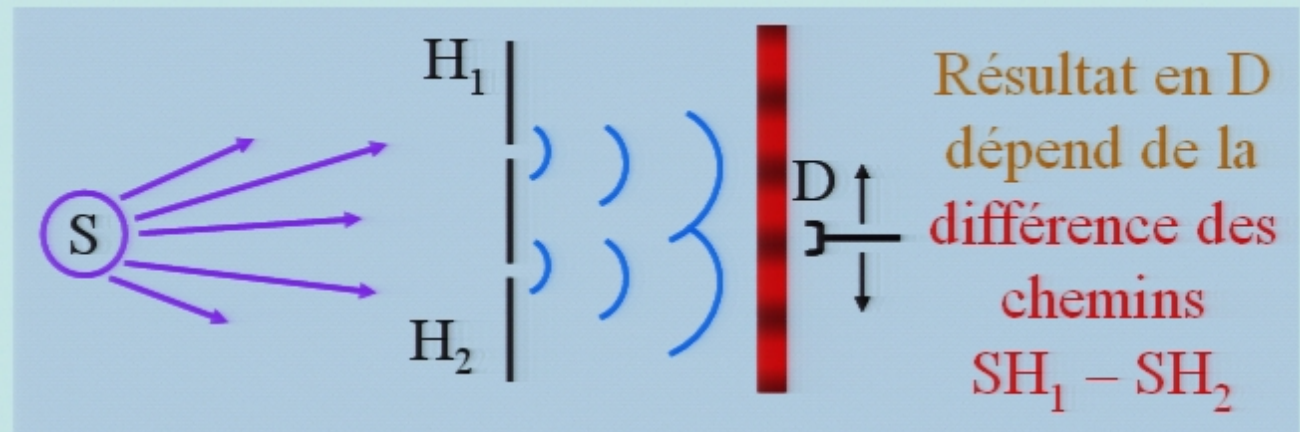
Première expérience

Observation d'un comportement corpusculaire: photon unique passe soit par H_1 soit par H_2 .



Deuxième expérience

Comportement ondulatoire: photon unique passe par les deux trous à la fois.



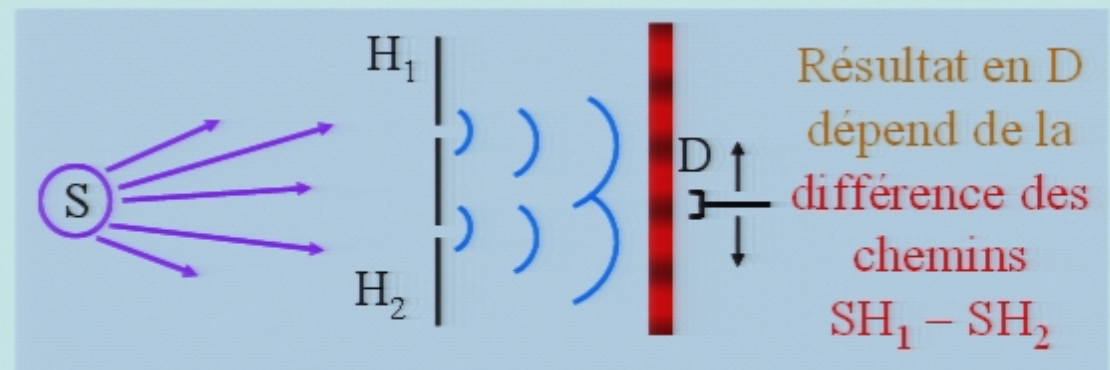
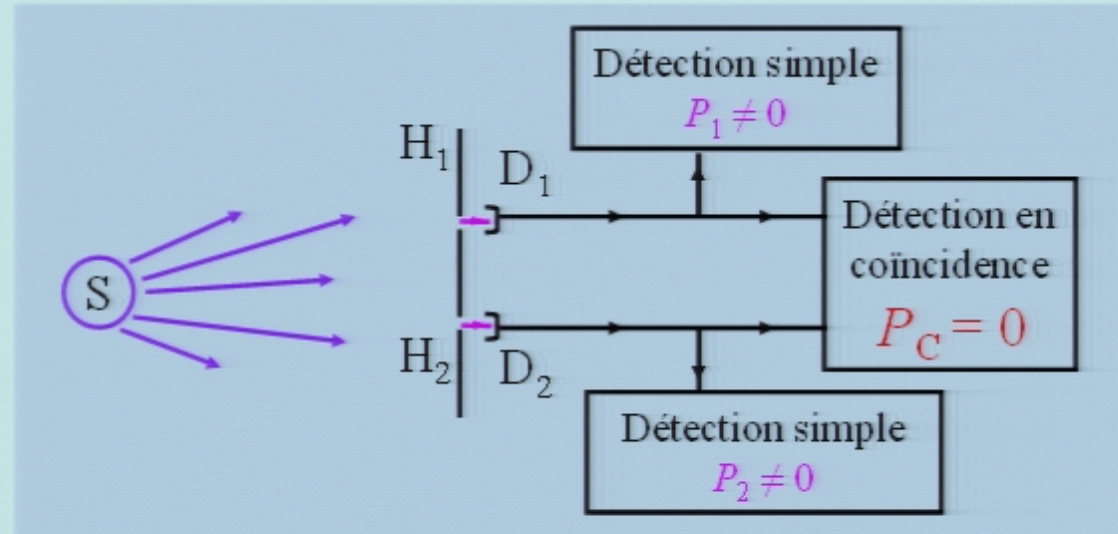
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

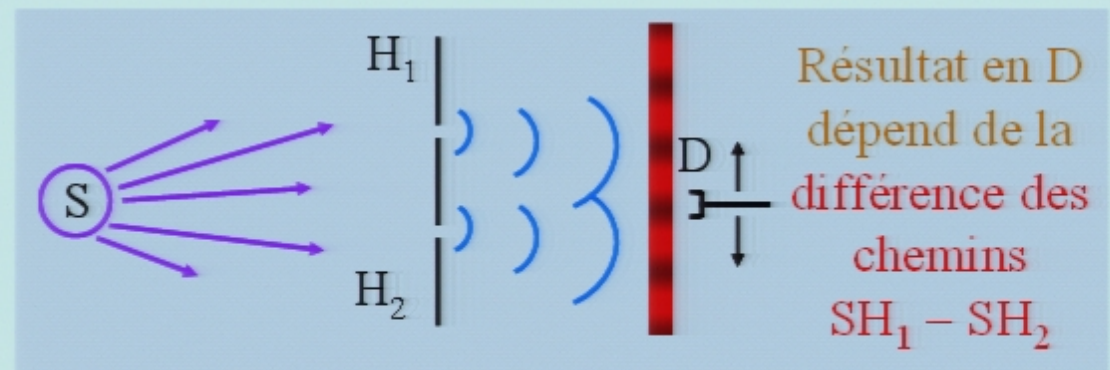
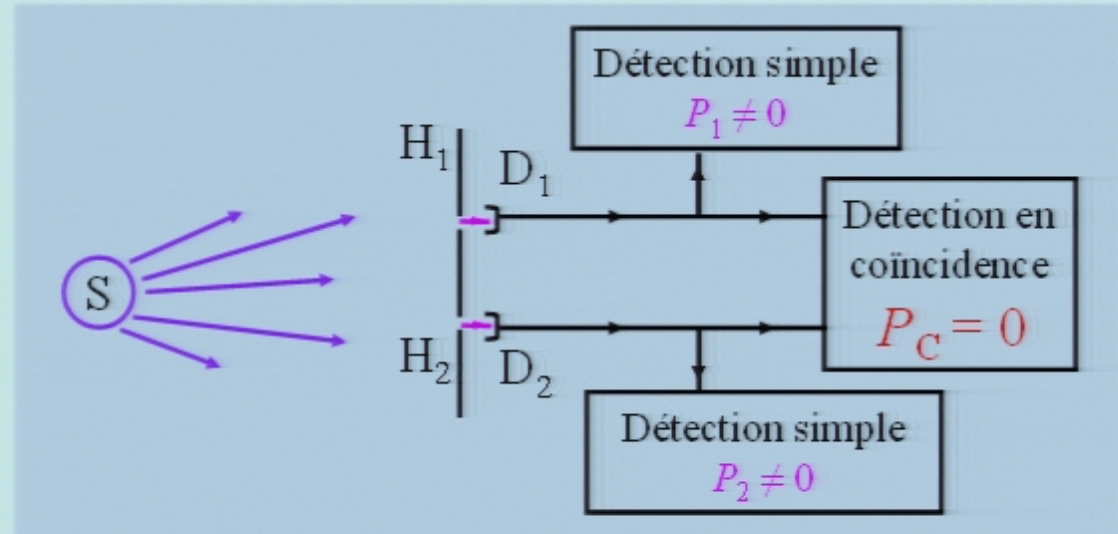
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

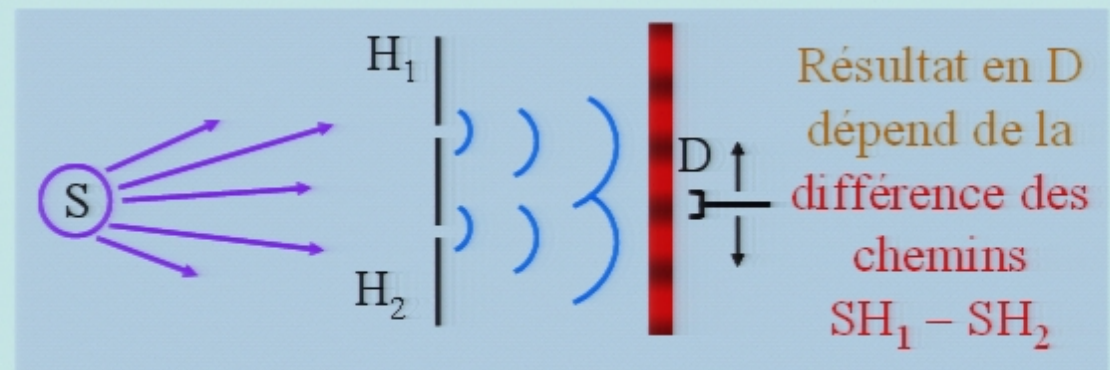
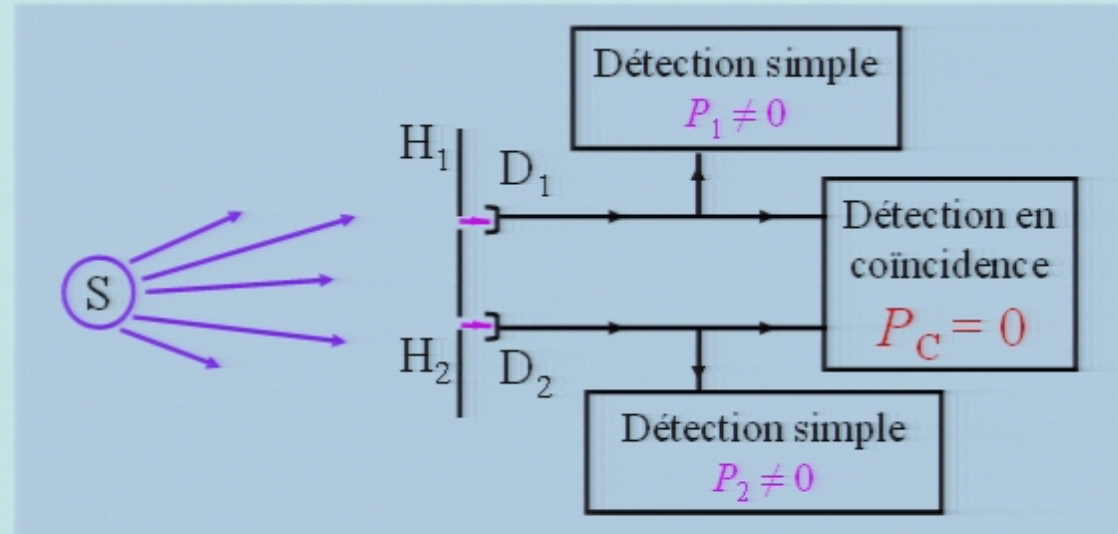
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

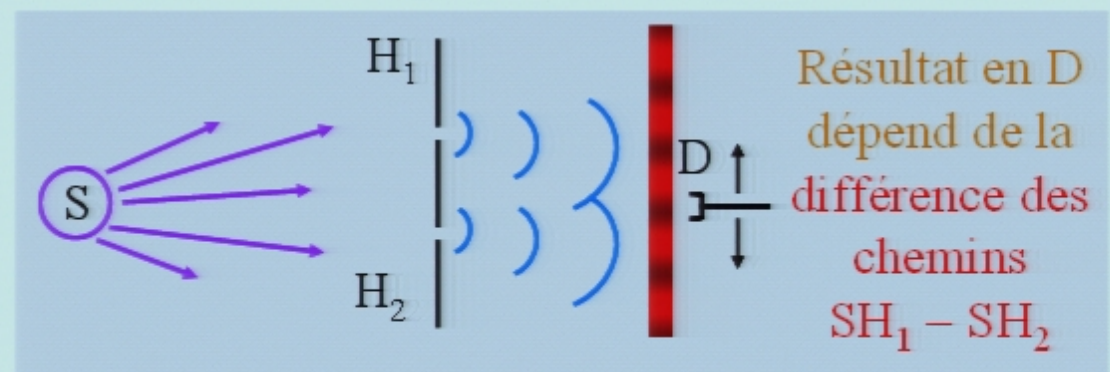
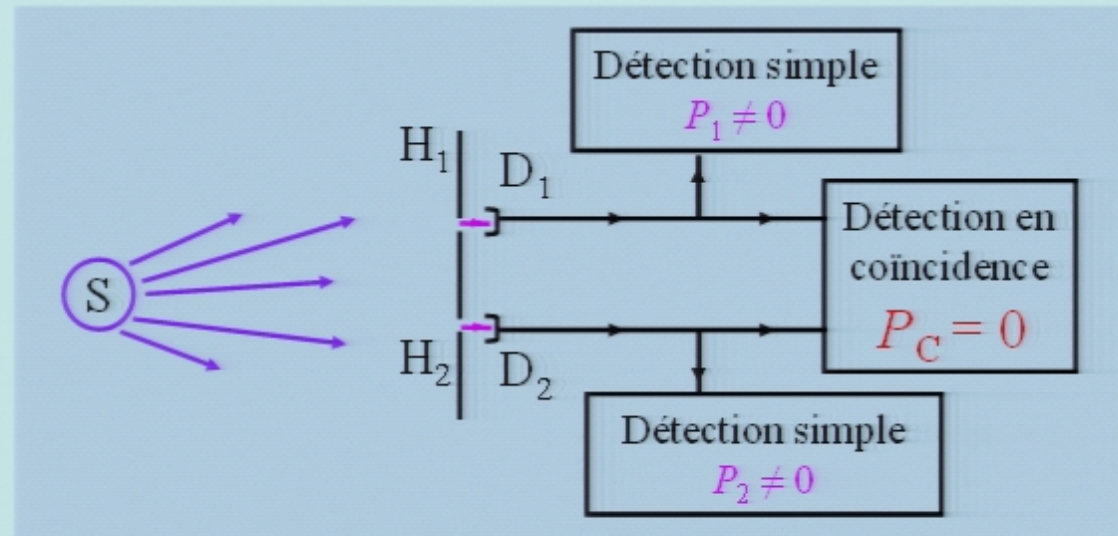
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

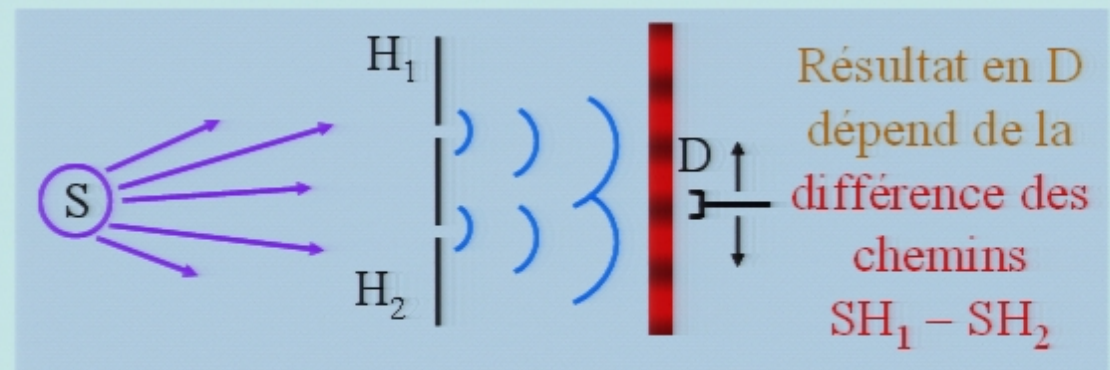
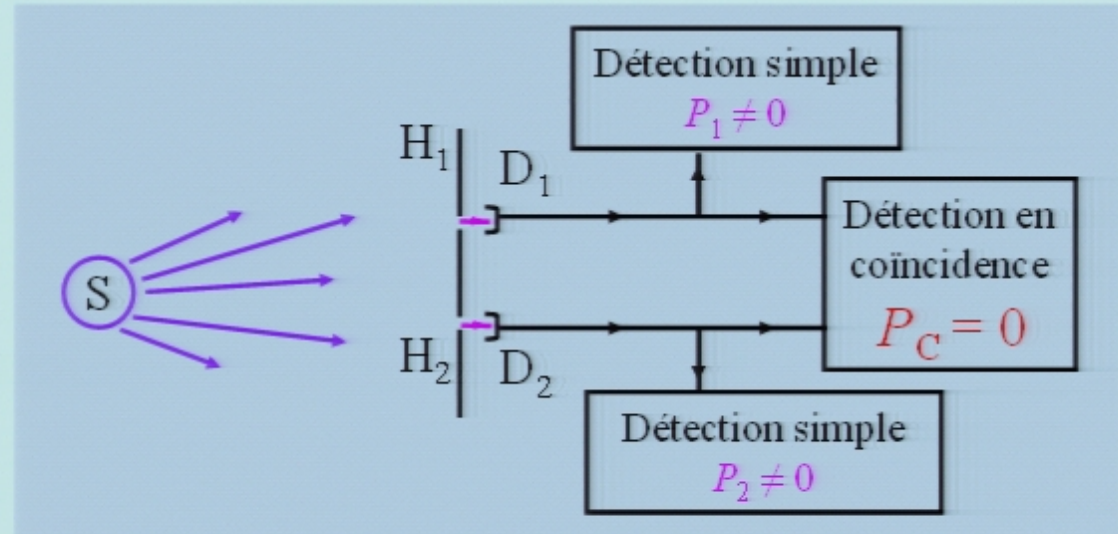
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

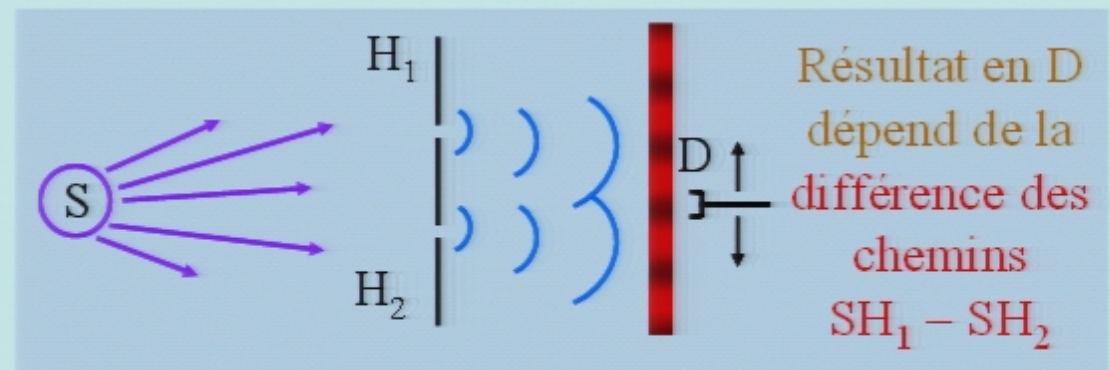
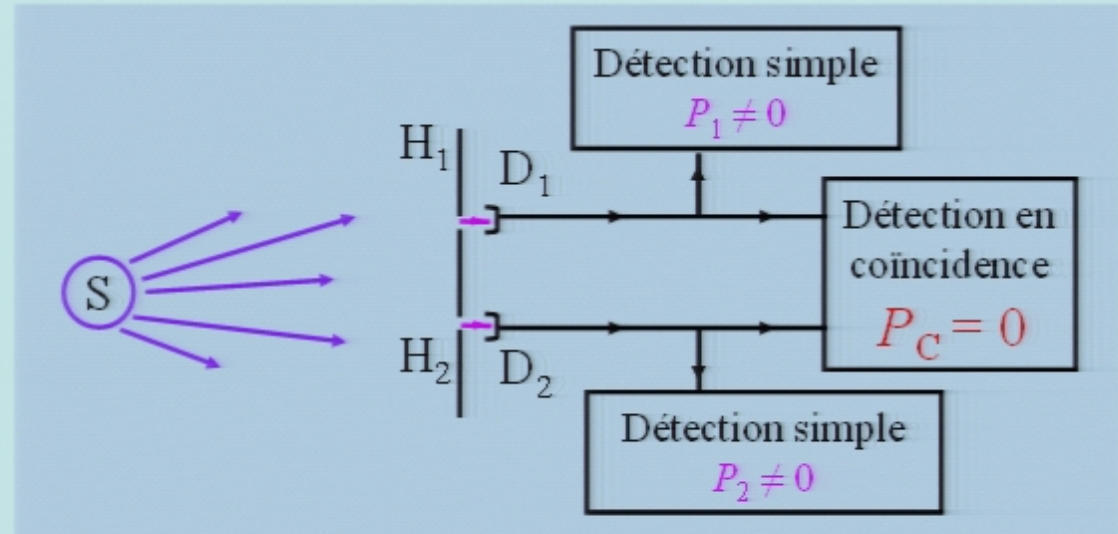
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

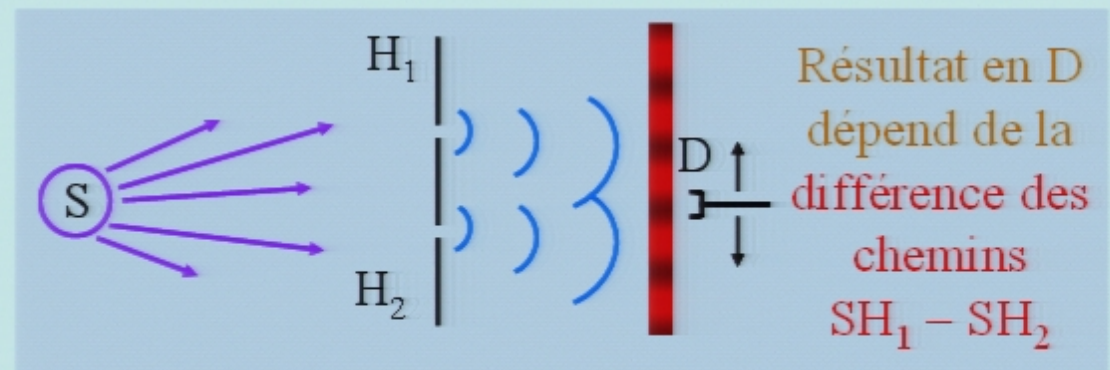
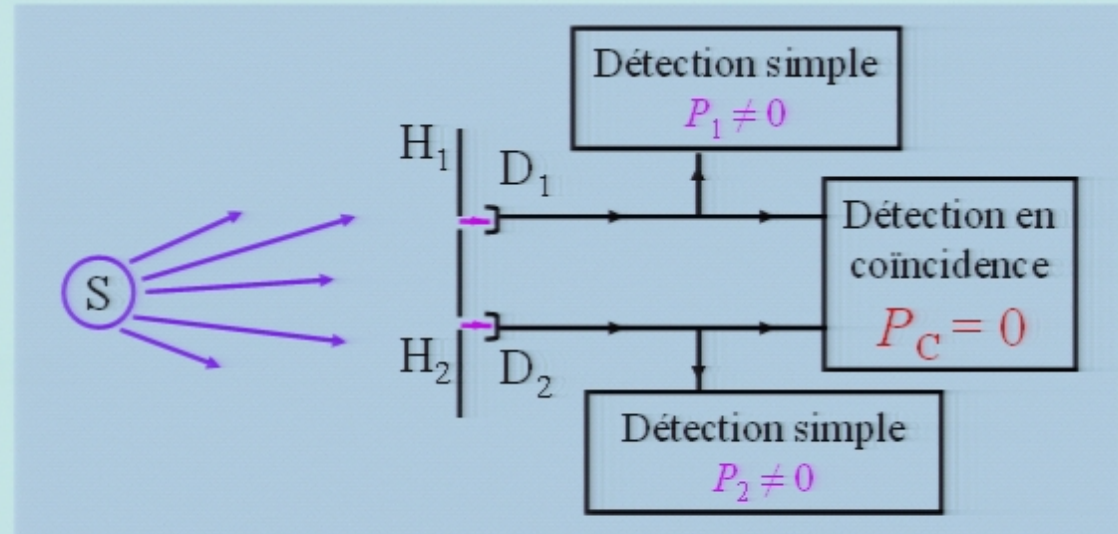
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

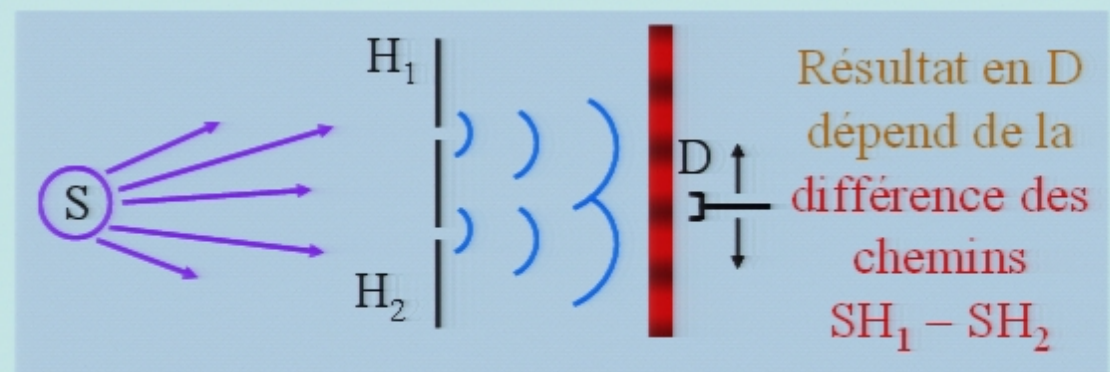
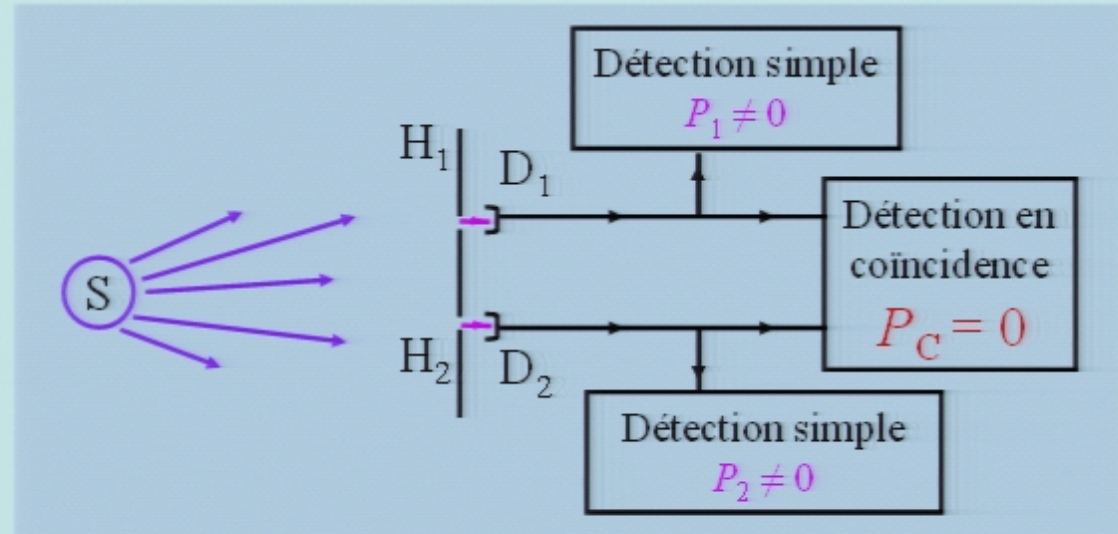
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

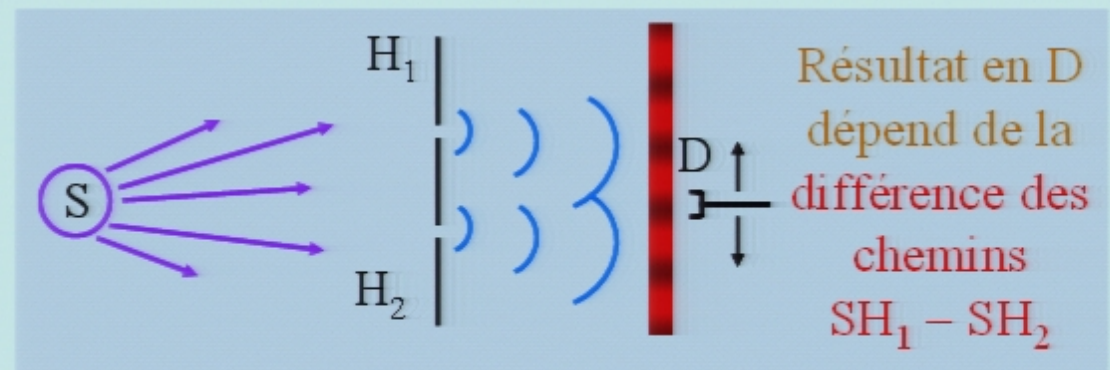
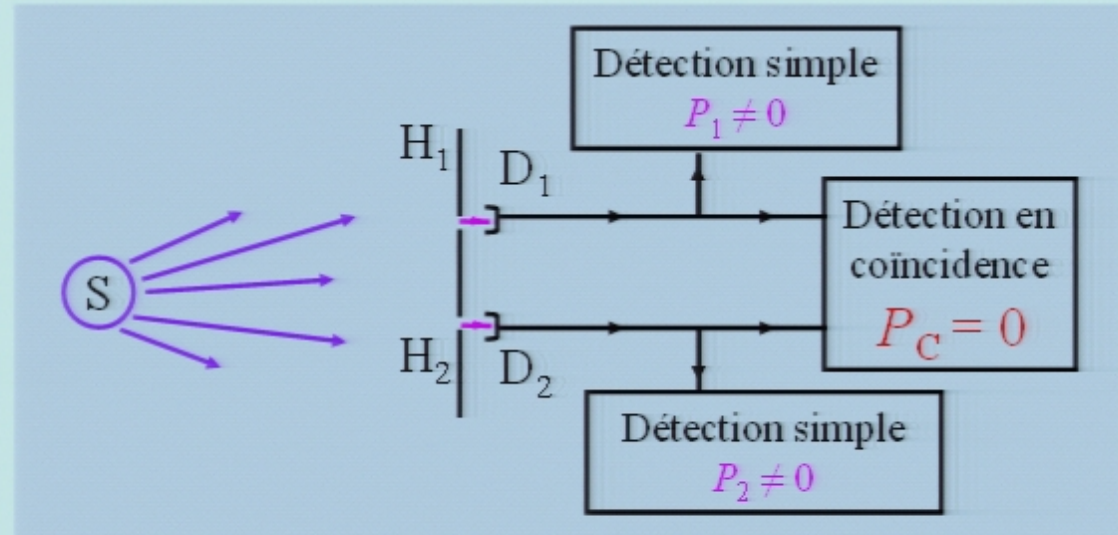
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

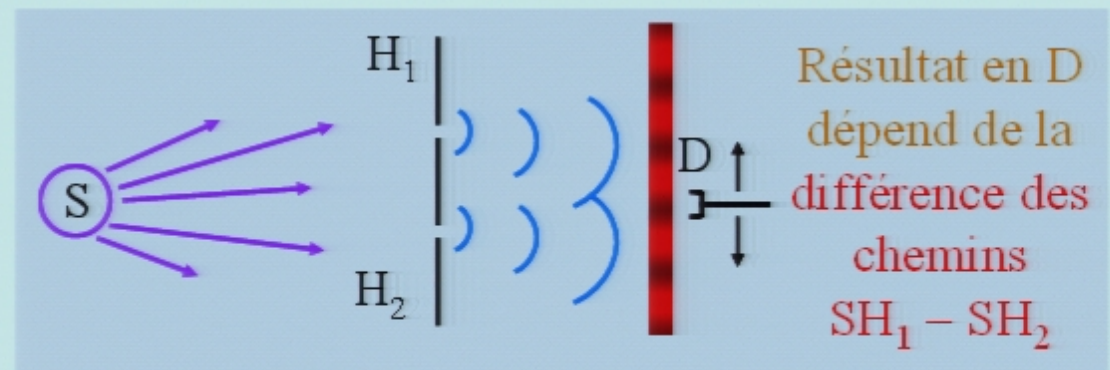
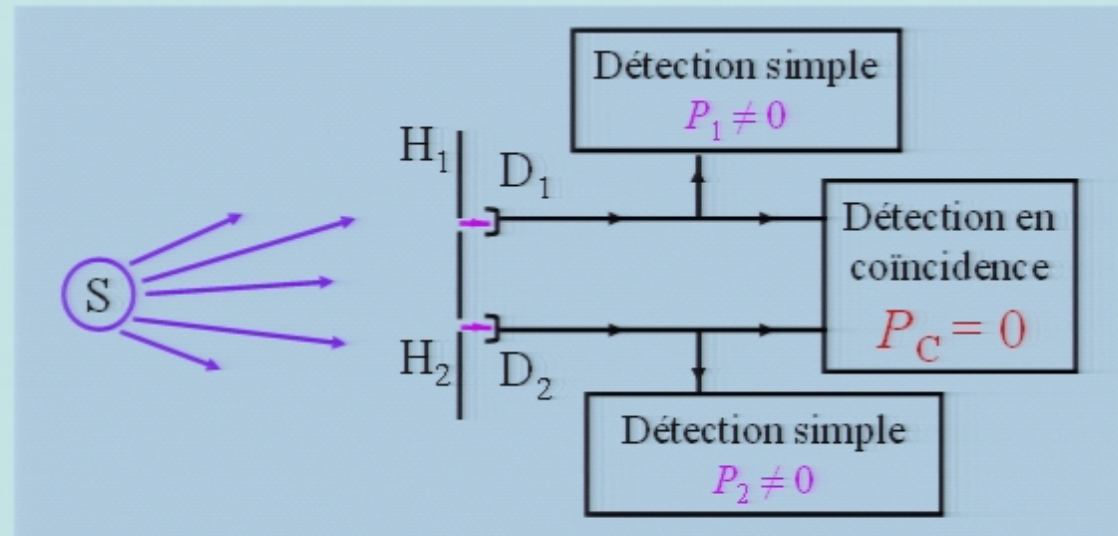
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

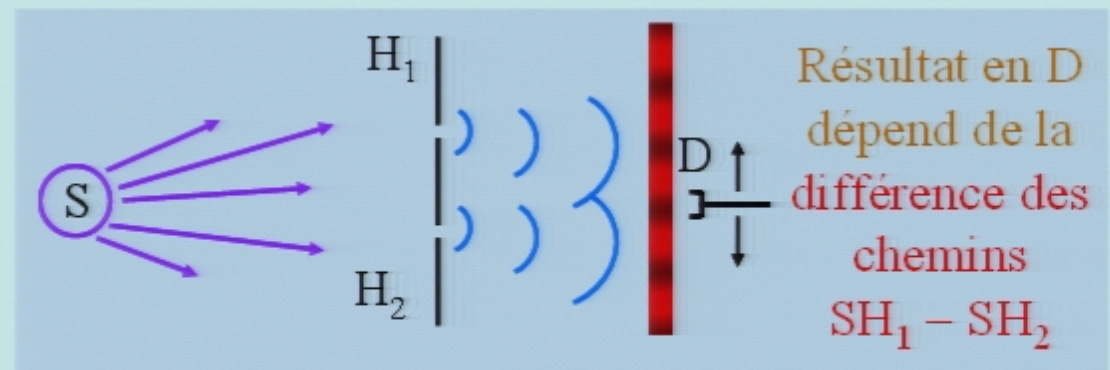
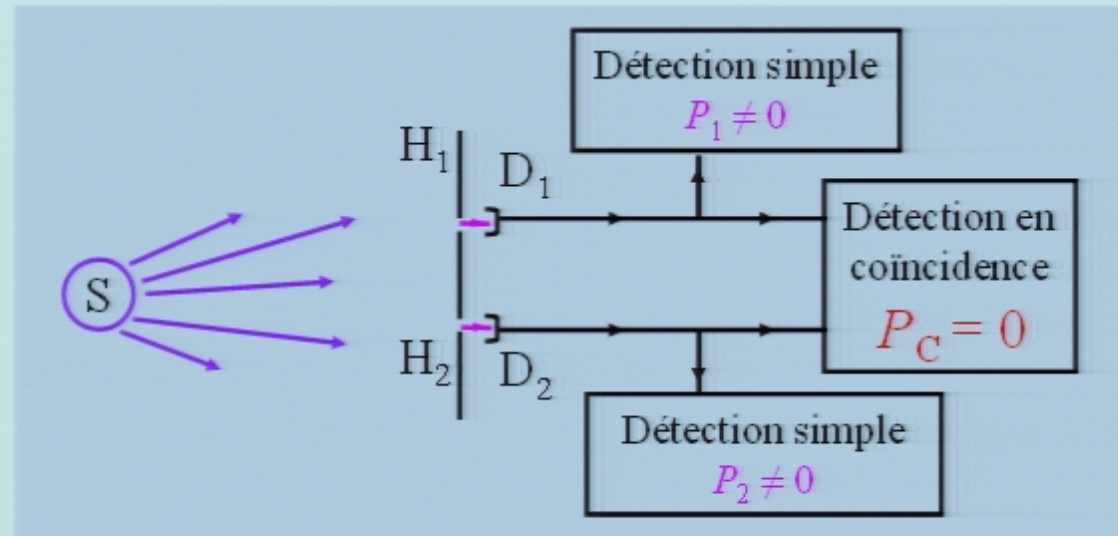
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

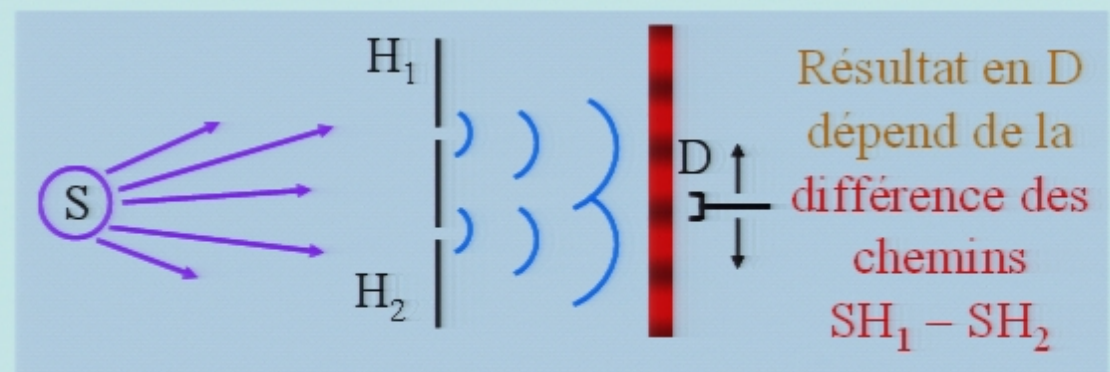
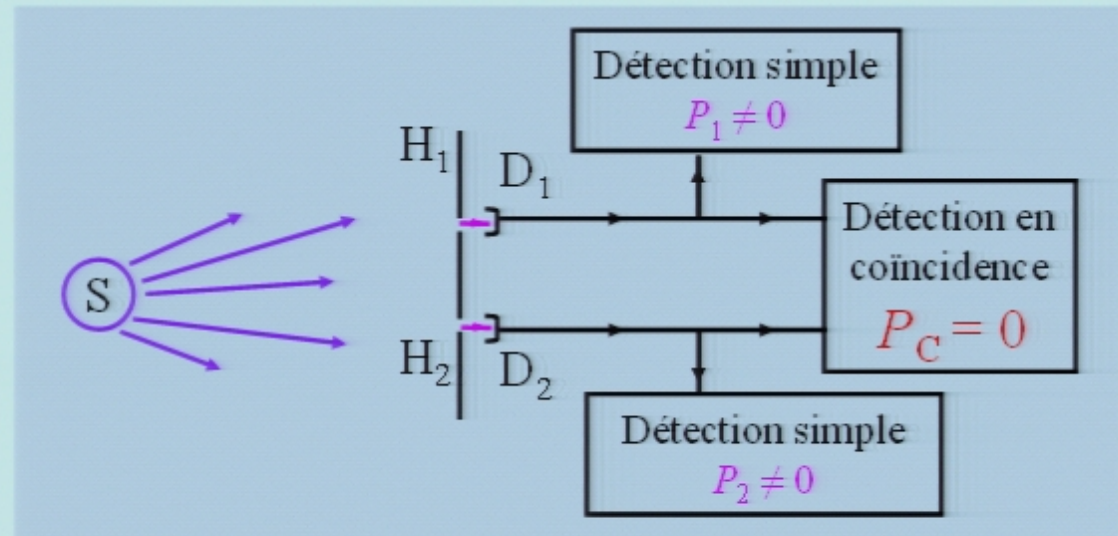
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

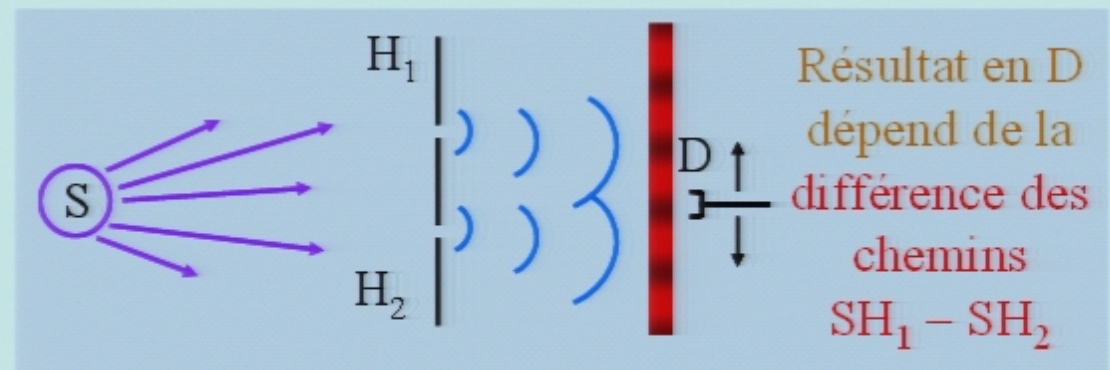
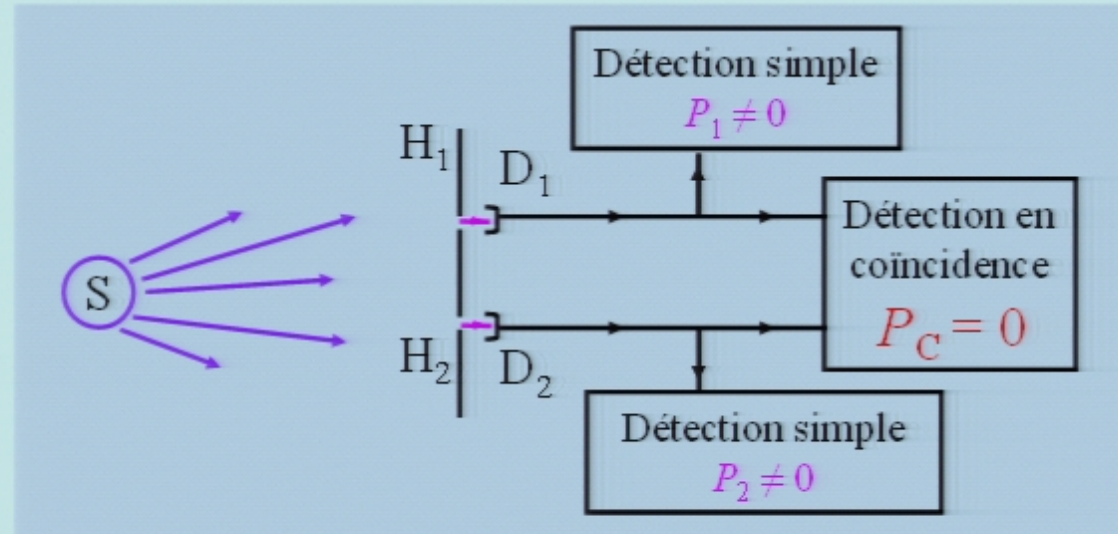
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

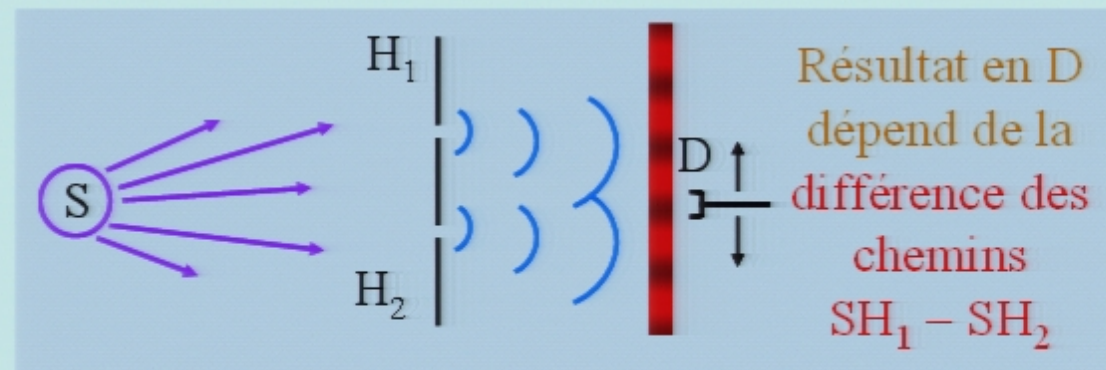
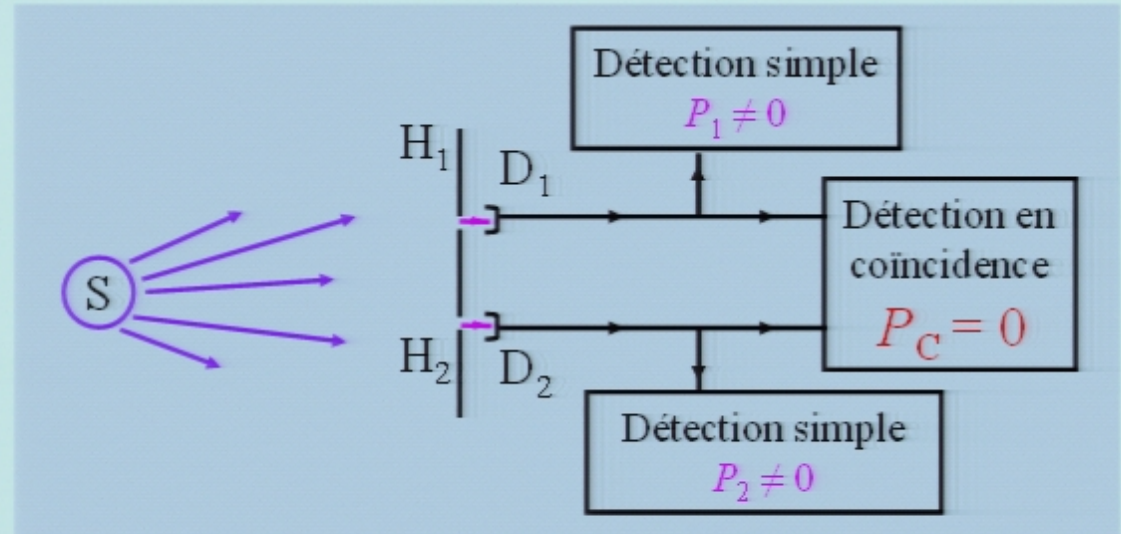
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

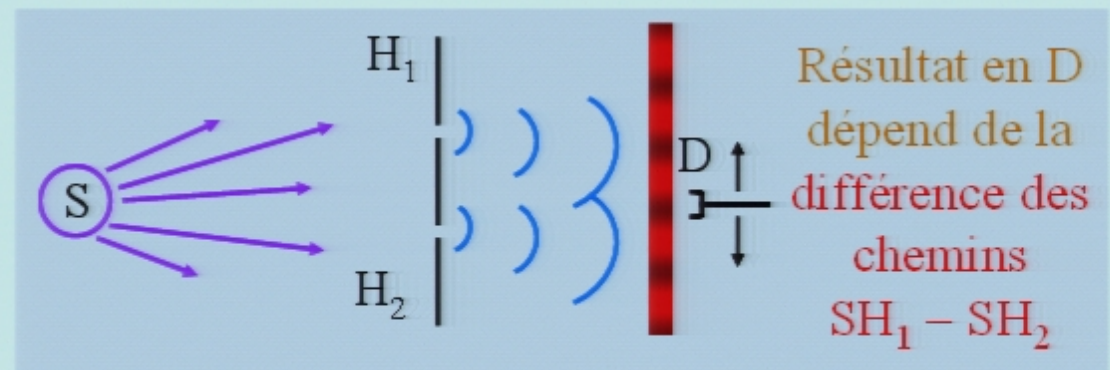
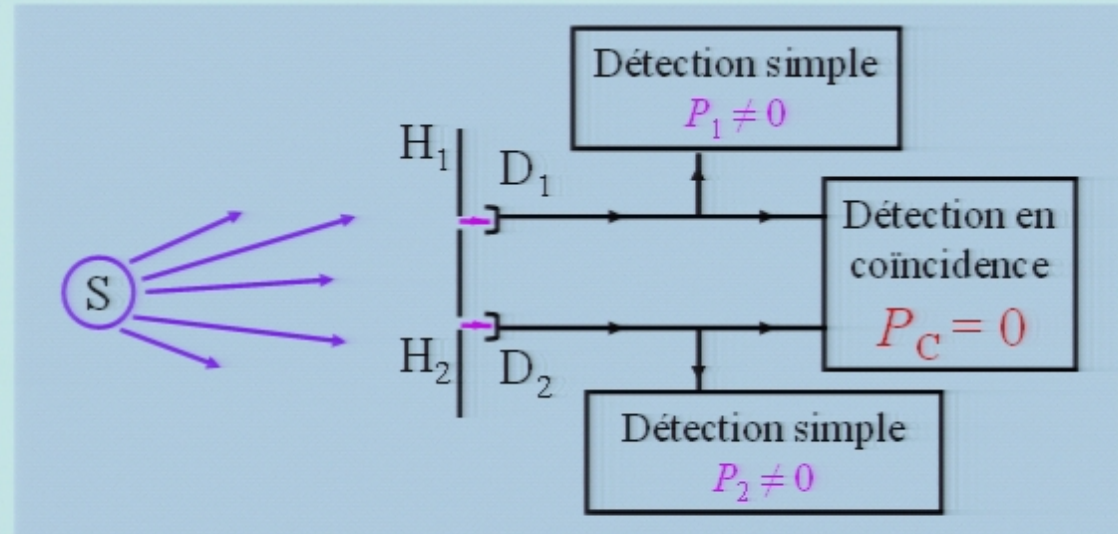
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

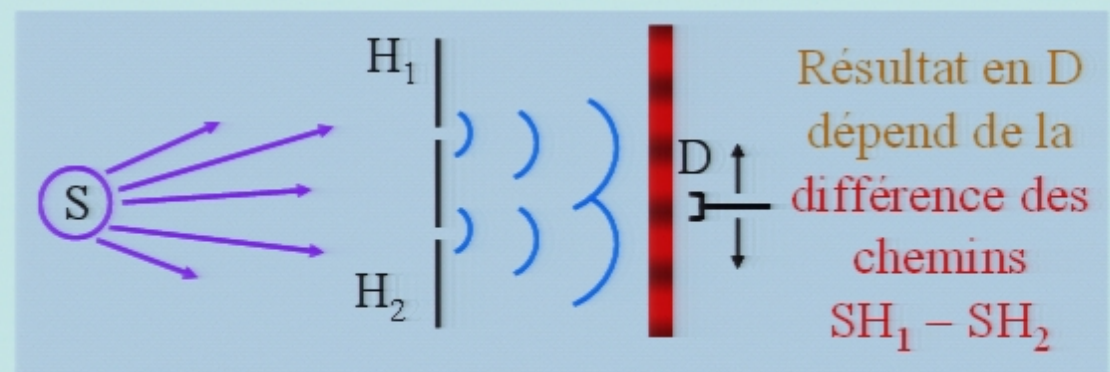
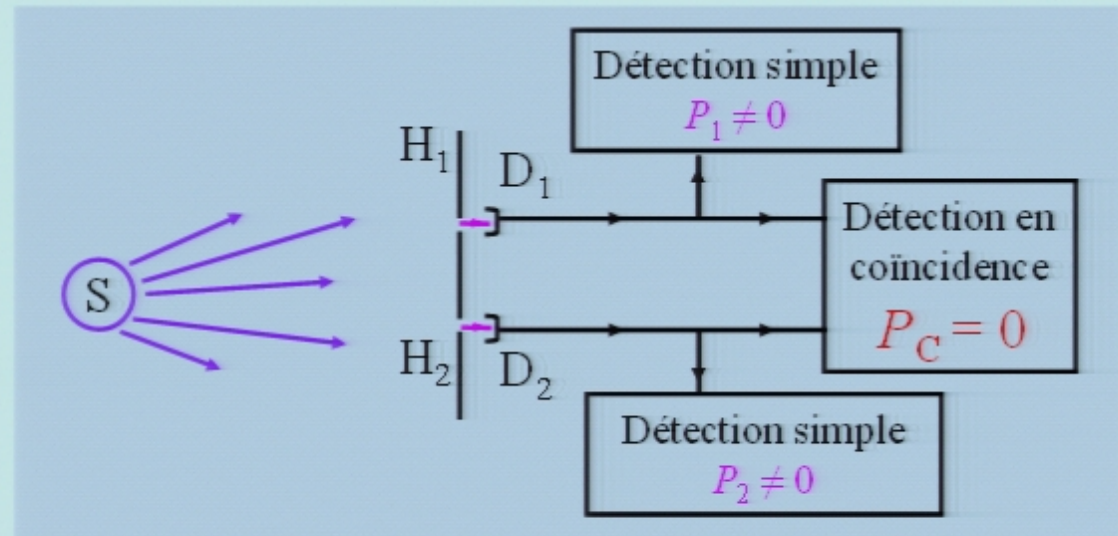
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

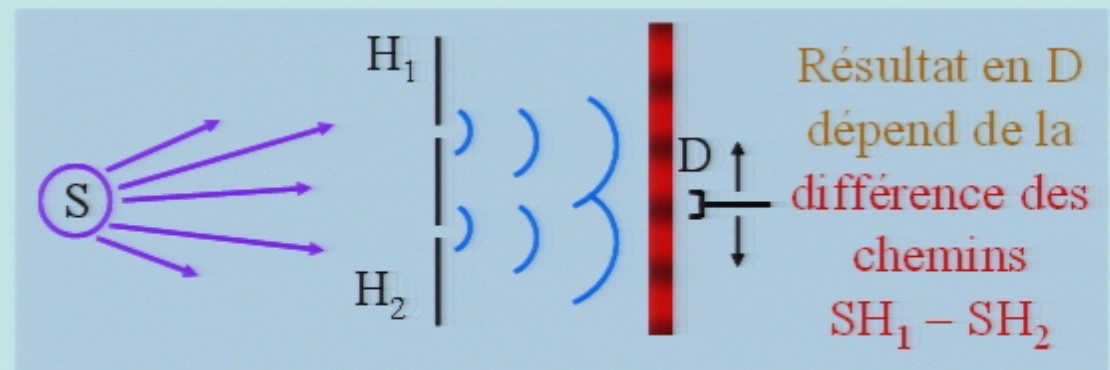
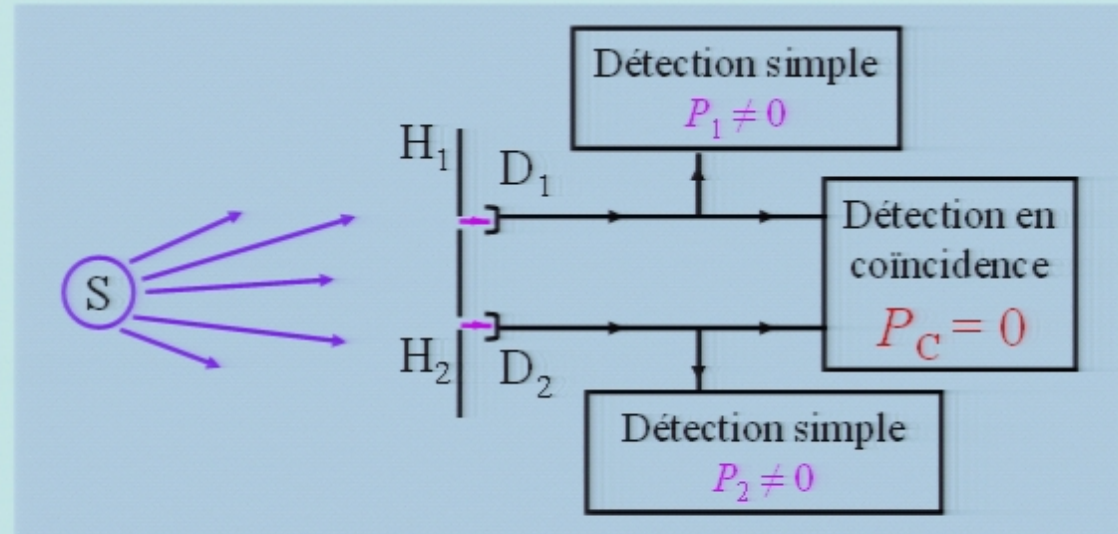
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

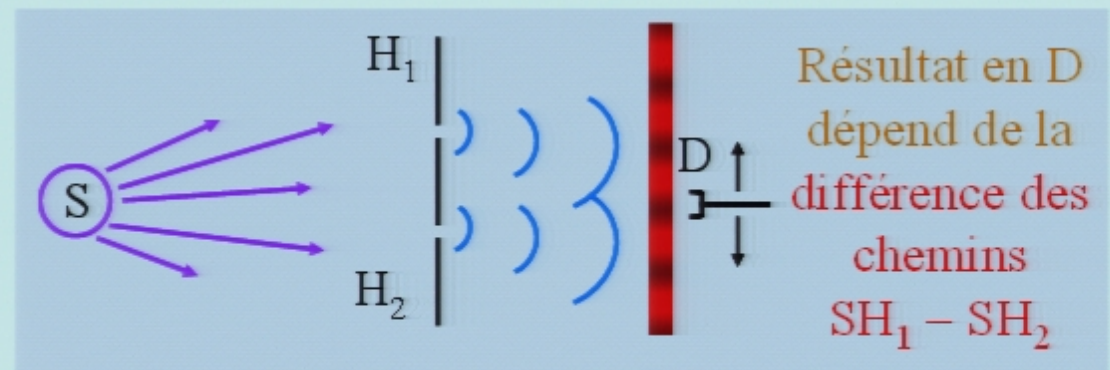
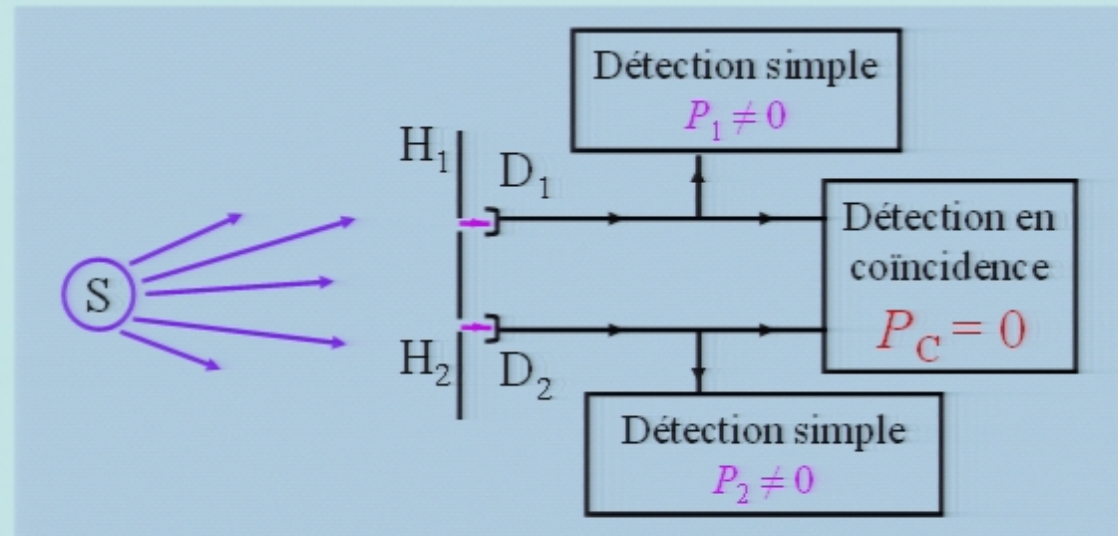
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

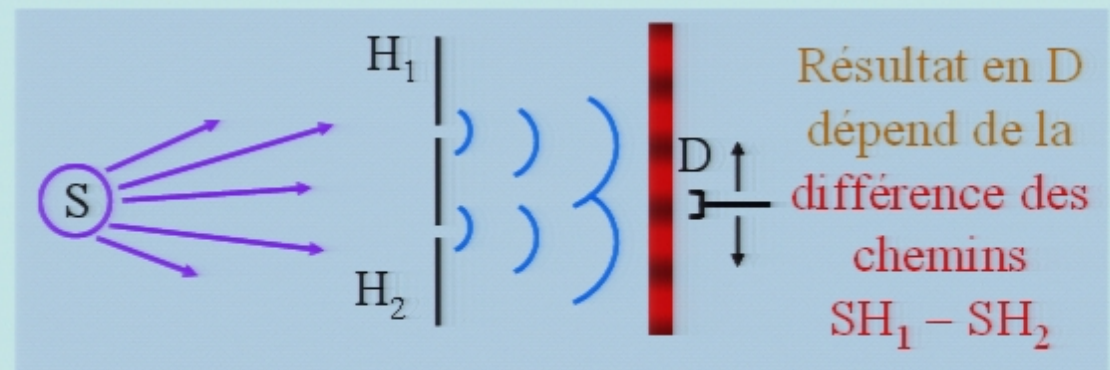
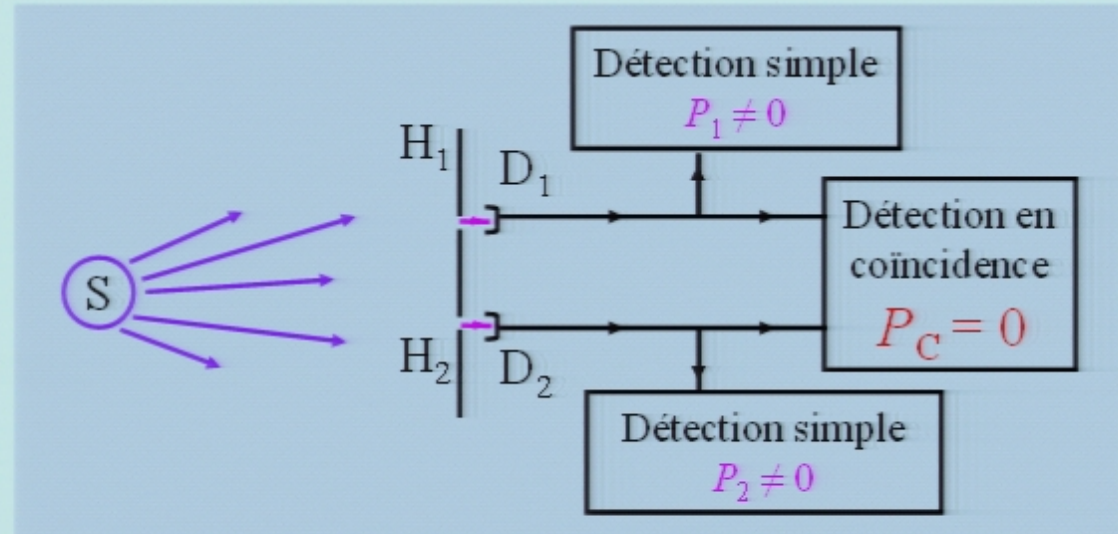
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

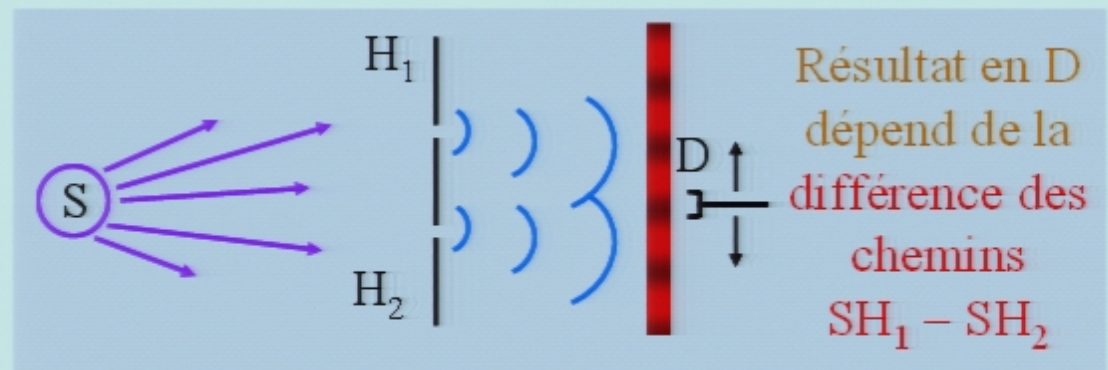
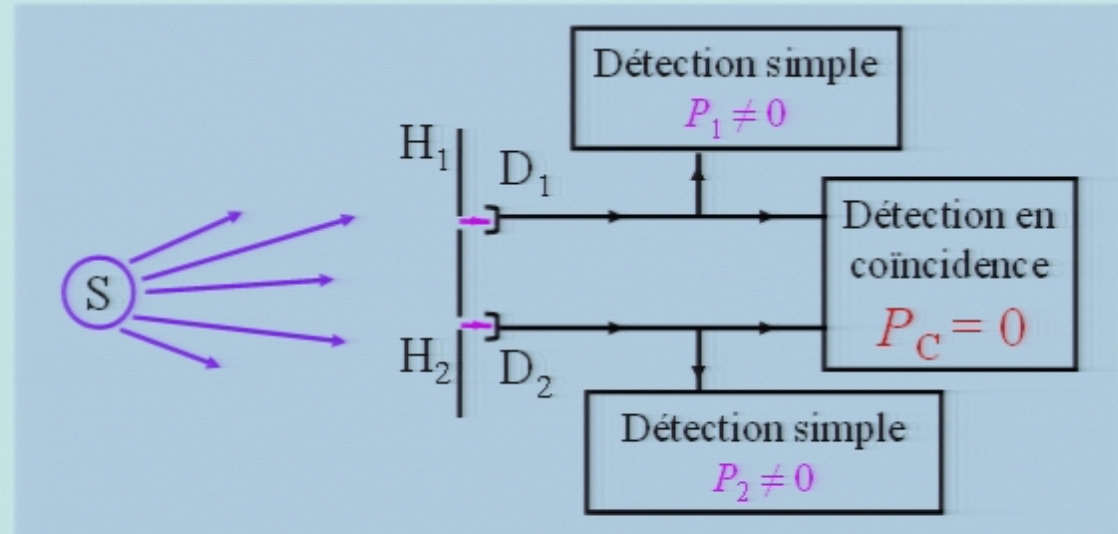
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

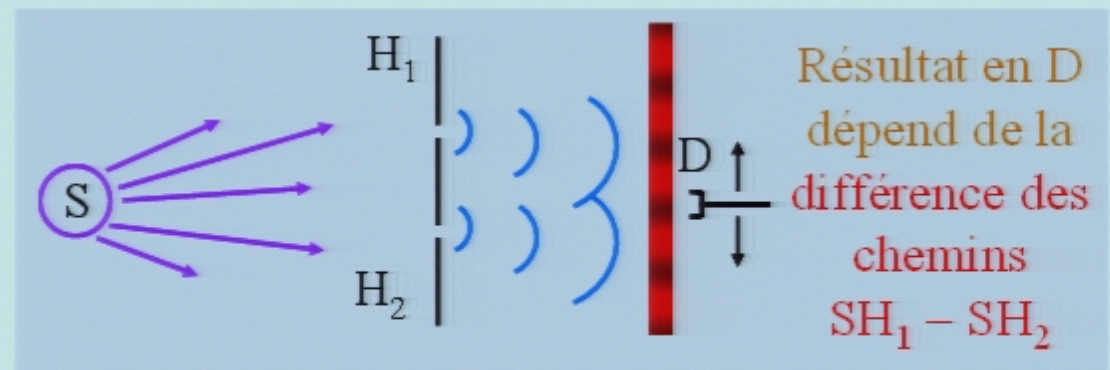
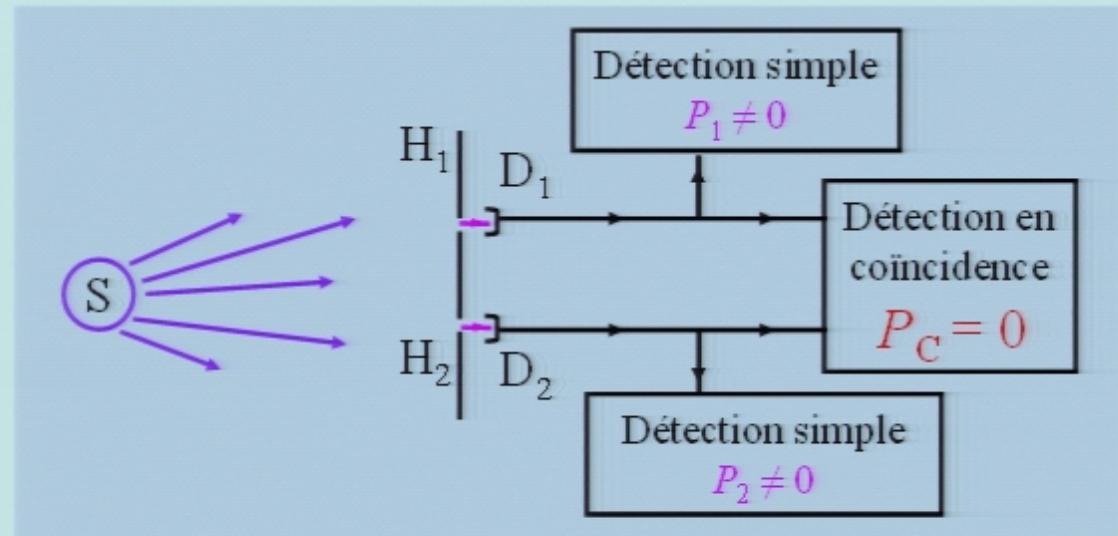
Pour se rassurer: la complémentarité de Bohr

Même source, même trous ! Incompréhensible avec images habituelles

Les deux expériences sont incompatibles. Il faut choisir la question posée au système:

- Par quel trou passe le photon ?
- Interférence ?

On ne peut poser les deux questions à la fois.



Que se passerait-il si on attendait que l'impulsion lumineuse ait dépassé les trous pour choisir l'appareillage ? Expérience « à choix retardé » (Wheeler). Réalisable aujourd'hui. Reste à faire.

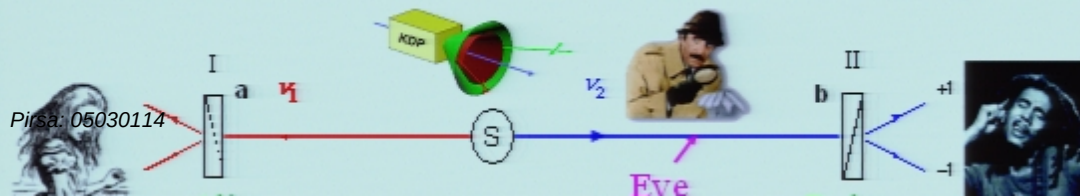
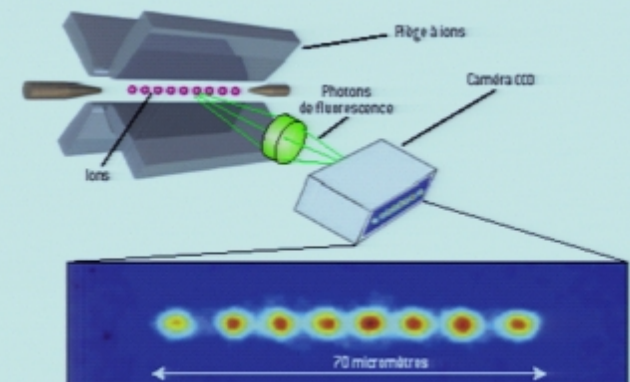
La dualité onde-particule

Les faits expérimentaux nous forcent à l'accepter. Difficile à réconcilier avec les images et la logique issues du monde à notre échelle. Mais, pour se rassurer:

- Le formalisme de l'optique quantique en rend compte de façon cohérente.
- La complémentarité de Bohr permet d'éviter les incohérences logiques.

Cela valait-il la peine de s'y intéresser ?

C'est en s'intéressant aux «bizarreries quantiques» qu'on a développé de nouvelles sources de lumière et qu'a germé l'idée de l'information quantique.



Fin du diaporama, cliquez pour quitter.

