

PRÉDICTIONS, HASARD DÉTERMINISTE ET HASARD INDÉTERMINISTE

Olivier Brodier
I.D.P. Tours

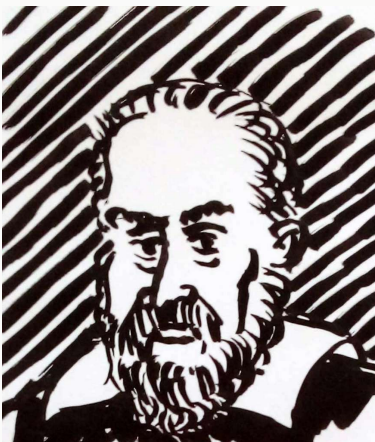
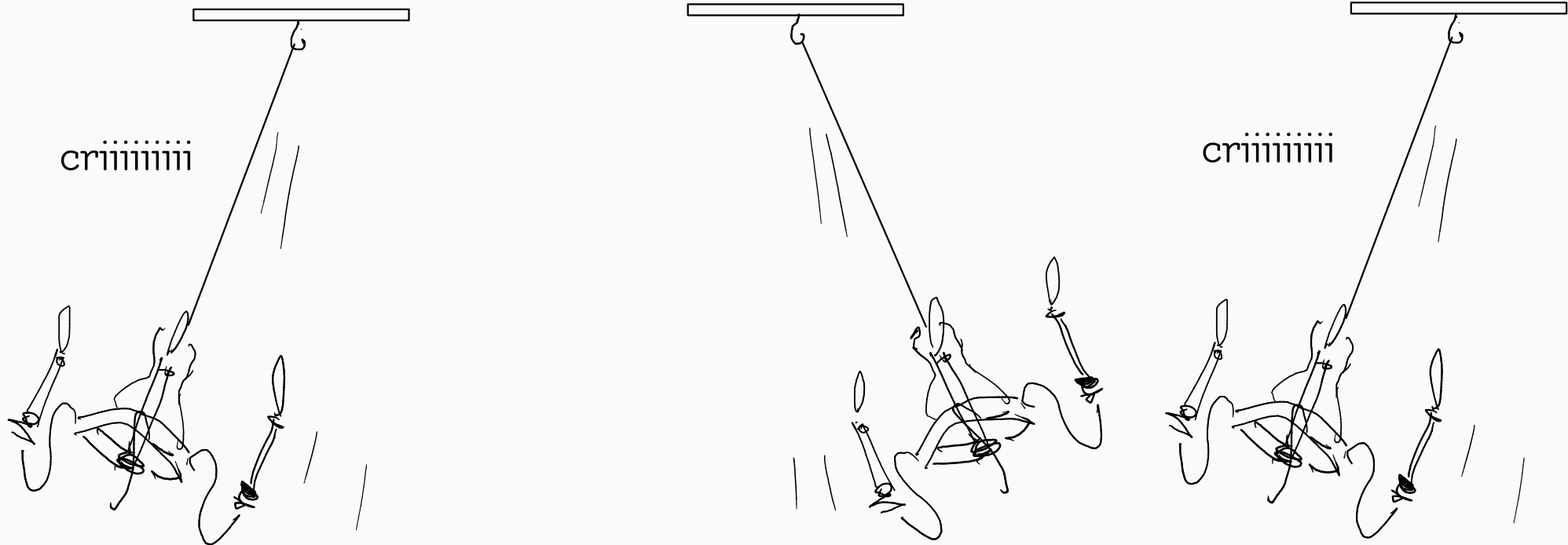
PLAN :

L'ÂGE D'OR DES PRÉDICTIONS

IGNORANCE DES CONDITIONS INITIALES

INDÉTERMINISME QUANTIQUE

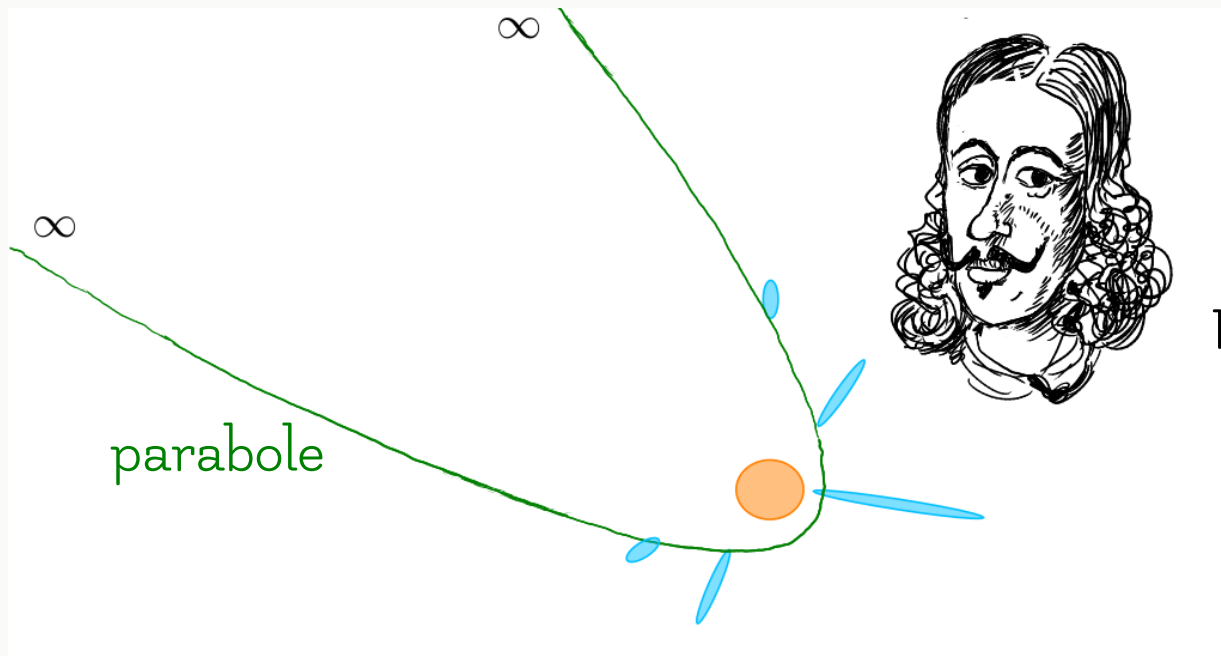
L'ÈRE DES CHOSES REPRODUCTIBLES



Galilée

période : 9 battements de cœur

PROGRÈS OBSERVATIONNEL



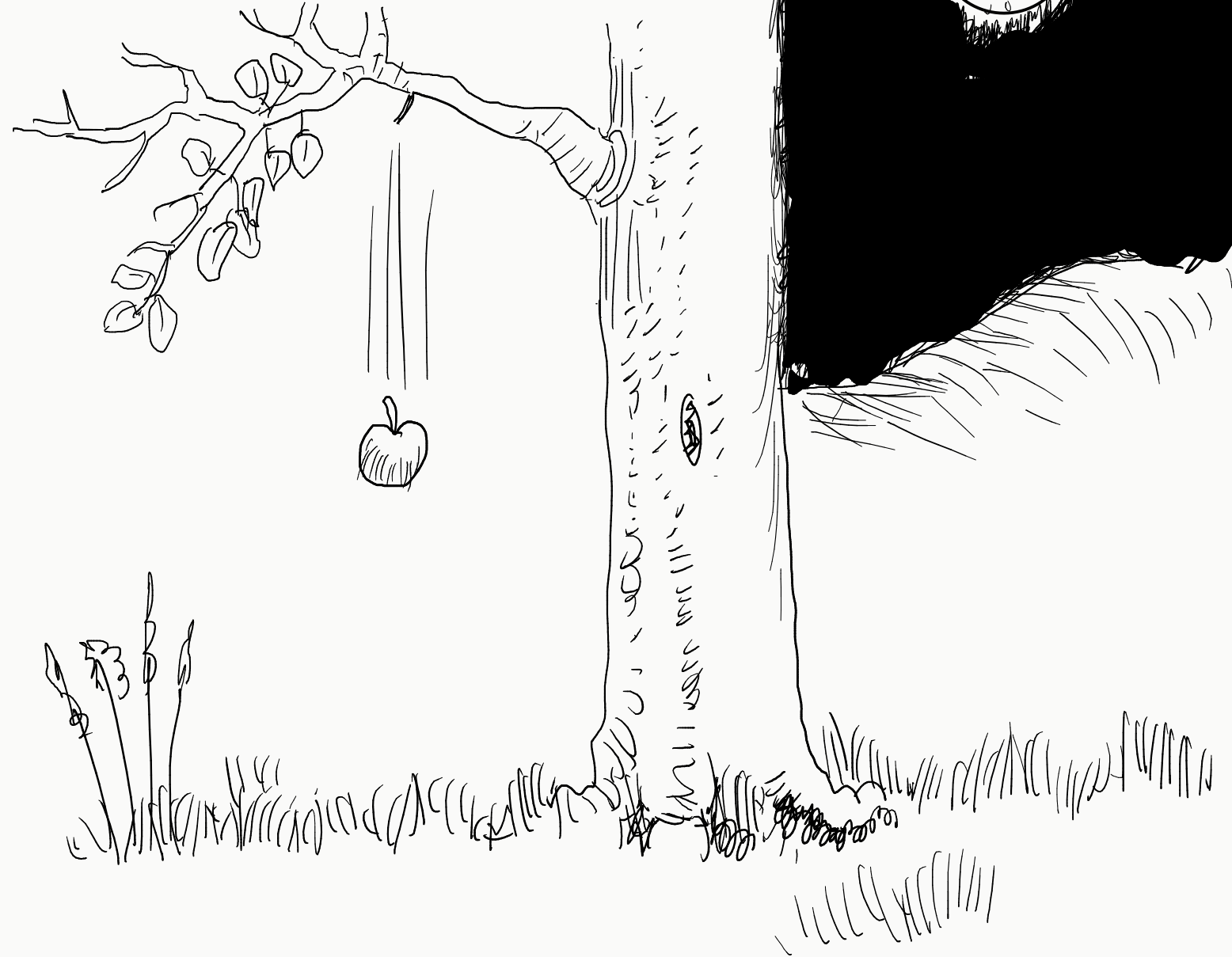
PROGRÈS THÉORIQUE



Newton

$$F = ma$$

$$F_g = \frac{GMm}{r^2}$$



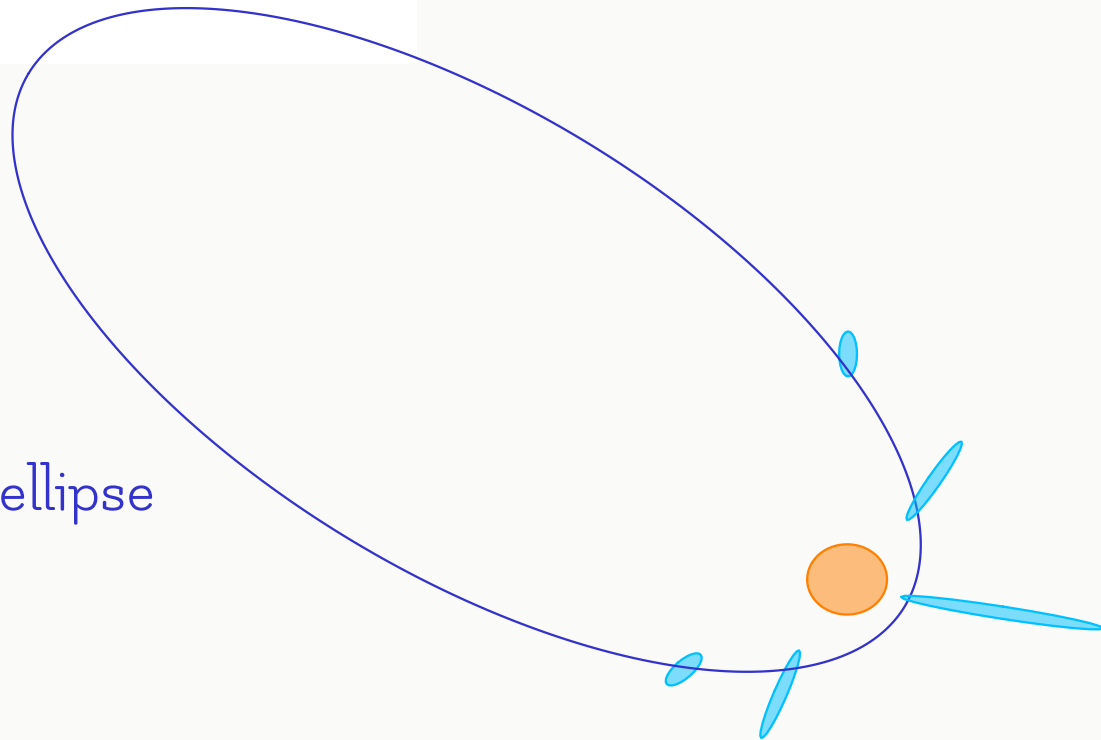
PRÉDICTIONS



Halley
en 1705

d'après la loi de
Newton la comète
devrait réapparaître
aux environs de
noël 1758

ellipse



VÉRIFICATIONS !!!



POSITIVISME

Auguste Comte XIX^{ème} siècle

«Le positivisme scientifique d'Auguste Comte s'en tient aux relations entre les phénomènes et ne cherche pas à connaître leur nature intrinsèque : il met l'accent sur les lois scientifiques et refuse la recherche des causes premières.»

Wikipédia

LE DÉTERMINISME DE LAPLACE



Laplace



présent :

connaissance de
toutes les positions
et vitesses de toutes
les particules

résoudre une
équation
différentielle



futur

EN PRATIQUE IL Y A JUSTE QUELQUES
DIFFICULTÉS TECHNIQUES



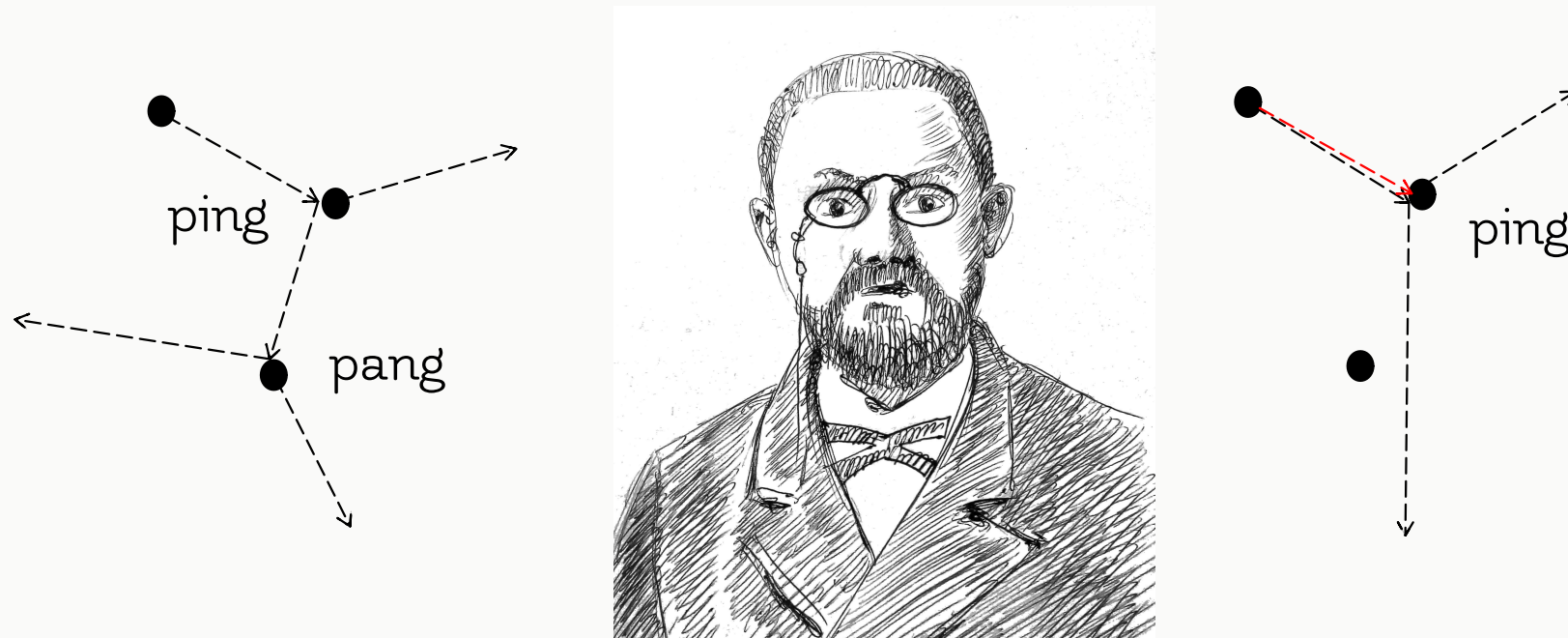
NOTION DE HASARD



COMMENT FONCTIONNE LE HASARD ?

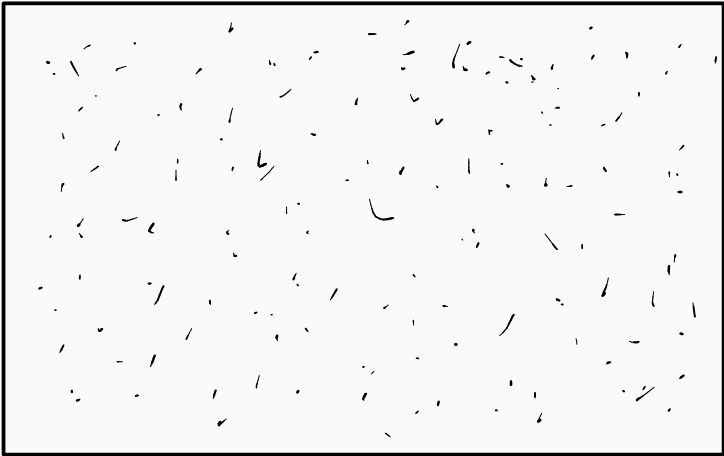
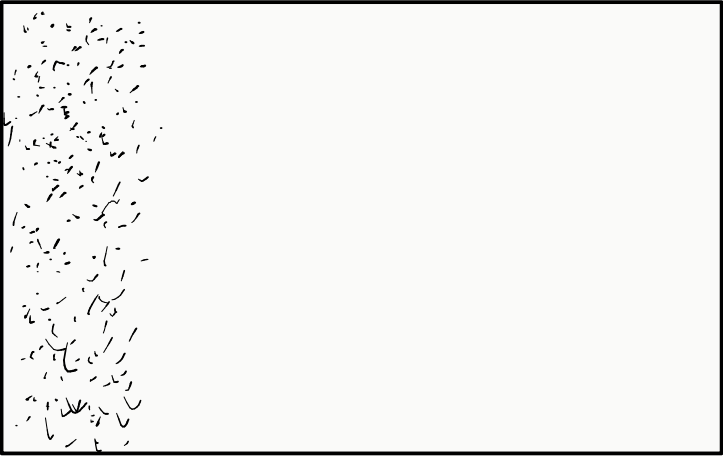
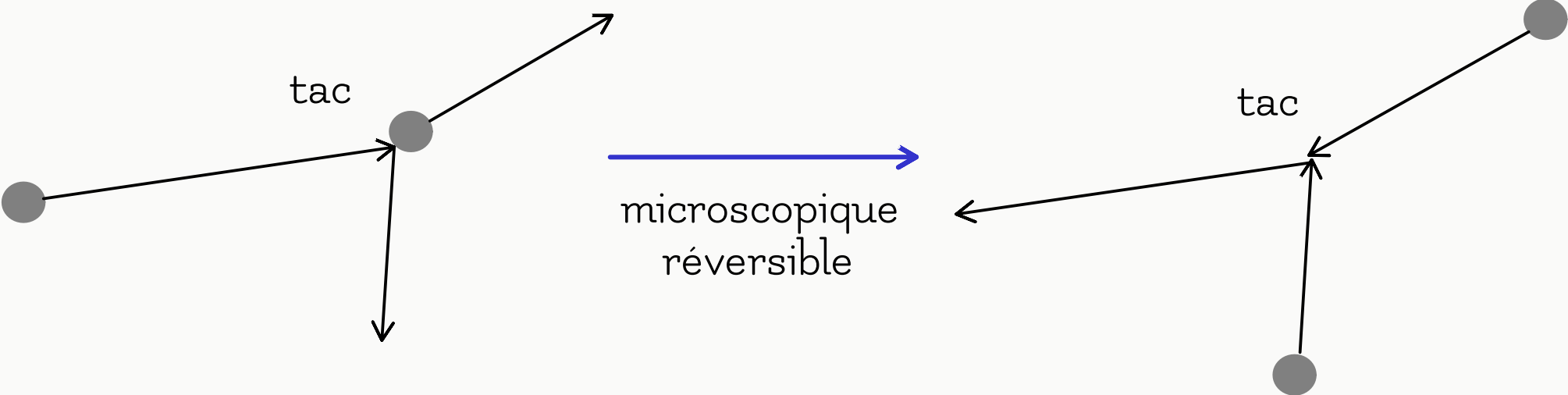
CHAOS DE POINCARÉ

«sensibilité aux conditions initiales»



le déterminisme de Laplace nécessite une connaissance des conditions initiales avec une **PRÉCISION INFINIE**

FONCTION «H» DE BOLTZMANN



macroscopique
irréversible



«H» augmente ...

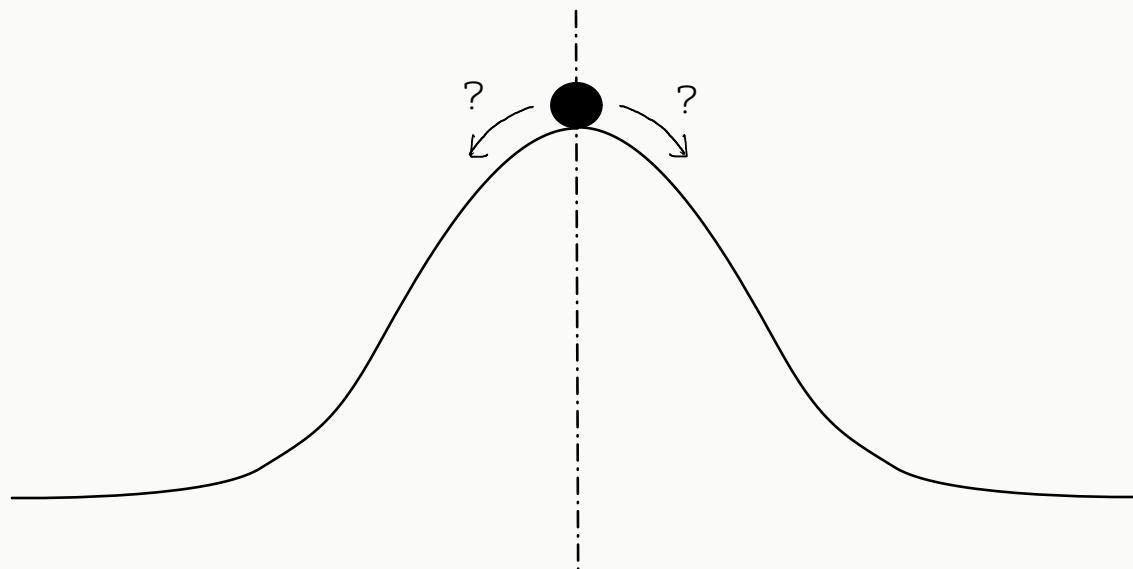


HASARD DÉTERMINISTE

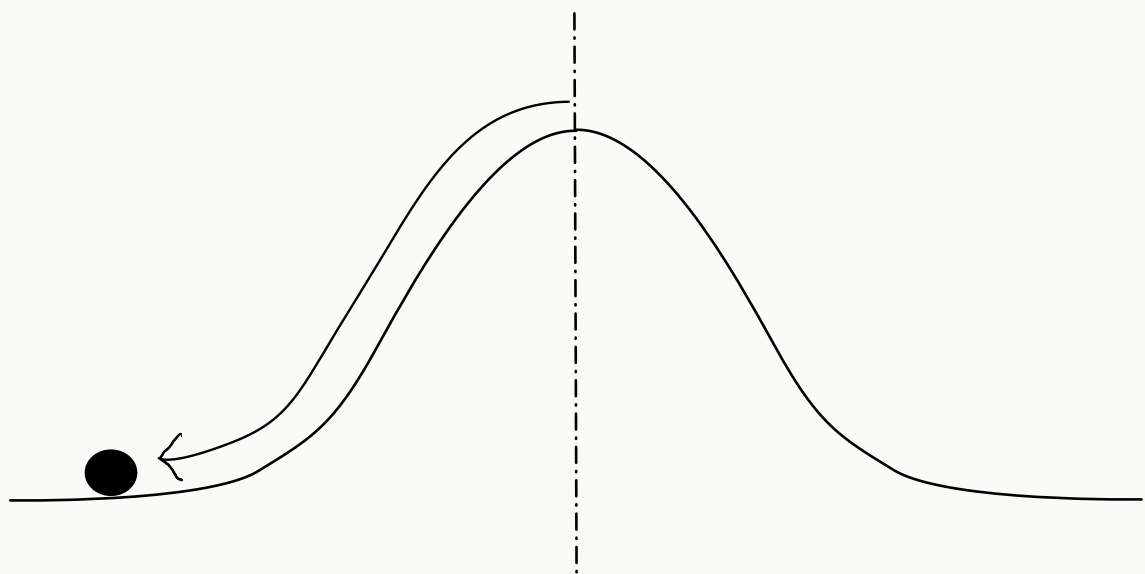
hasard lié à une ignorance



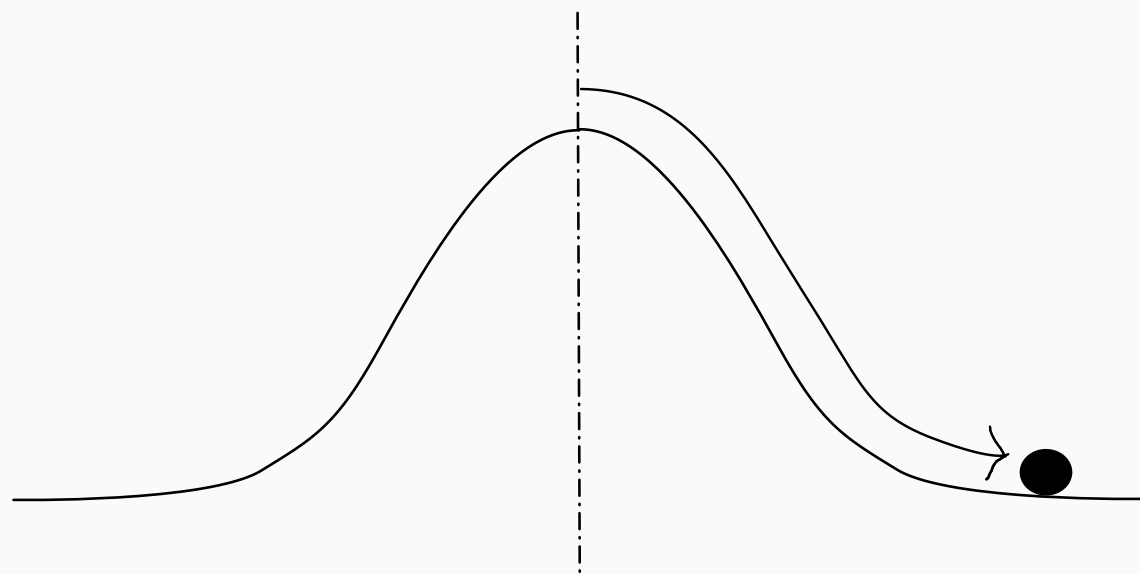
IGNORANCE ACCENTUÉE PAR DES SYMÉTRIES



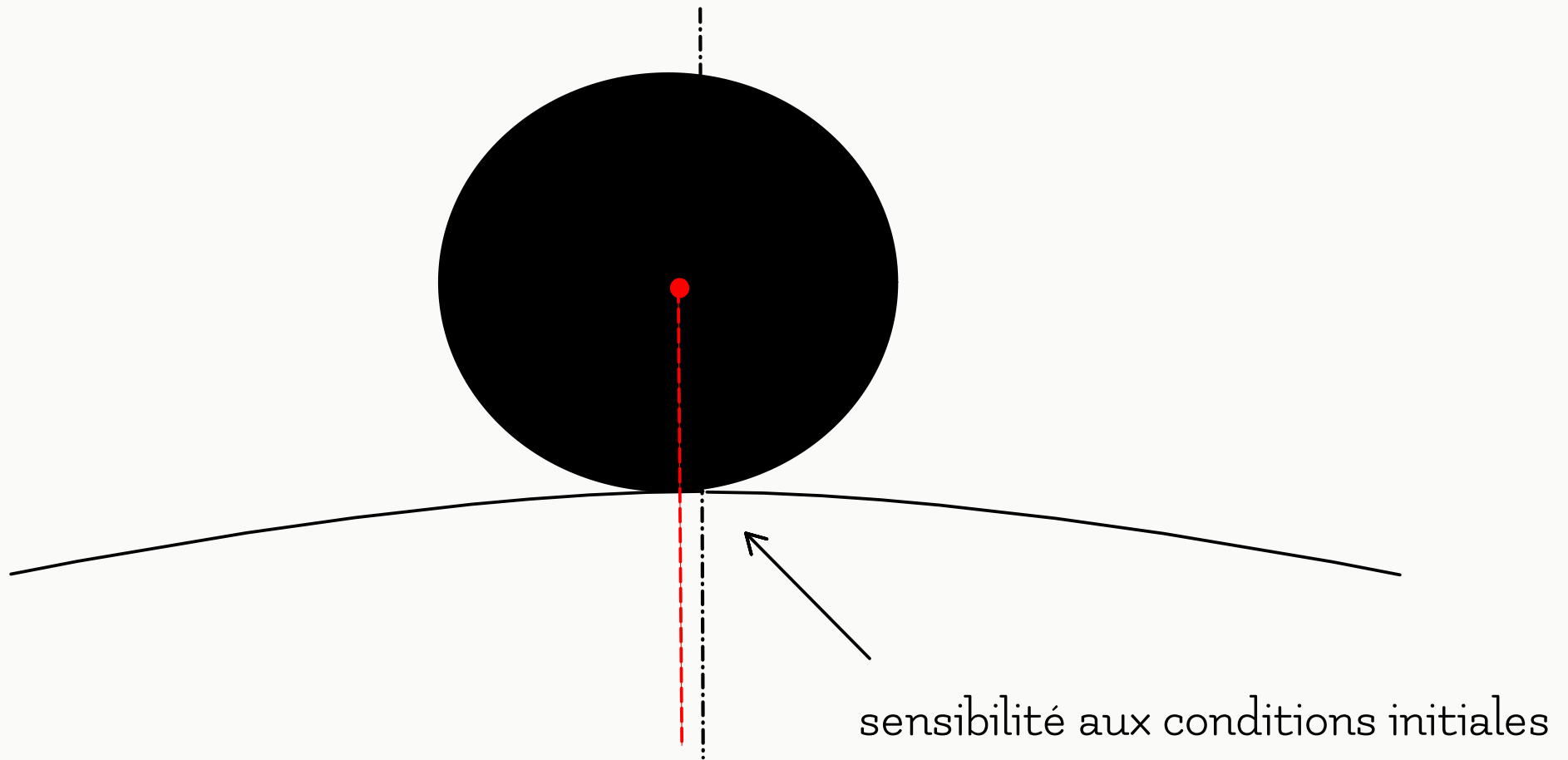
probabilité $1/2$



probabilité $1/2$



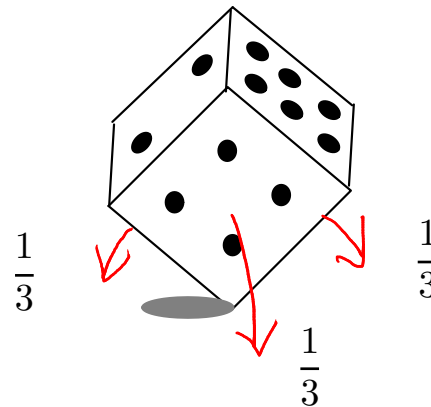
mais si on regardait de TRÈS TRÈS près



STRATÉGIES POUR CRÉER DU HASARD



la forme symétrique permet d'avoir des «points d'instabilité»

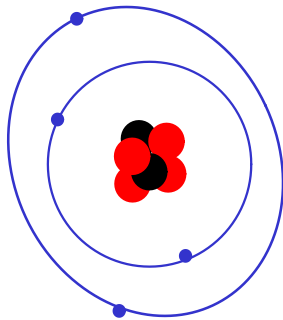


LE HASARD EN MÉCANIQUE QUANTIQUE :

UN HASARD NON DÉTERMINISTE ?

atome :

dans l'imaginaire positiviste :



modèle planétaire

en vrai :

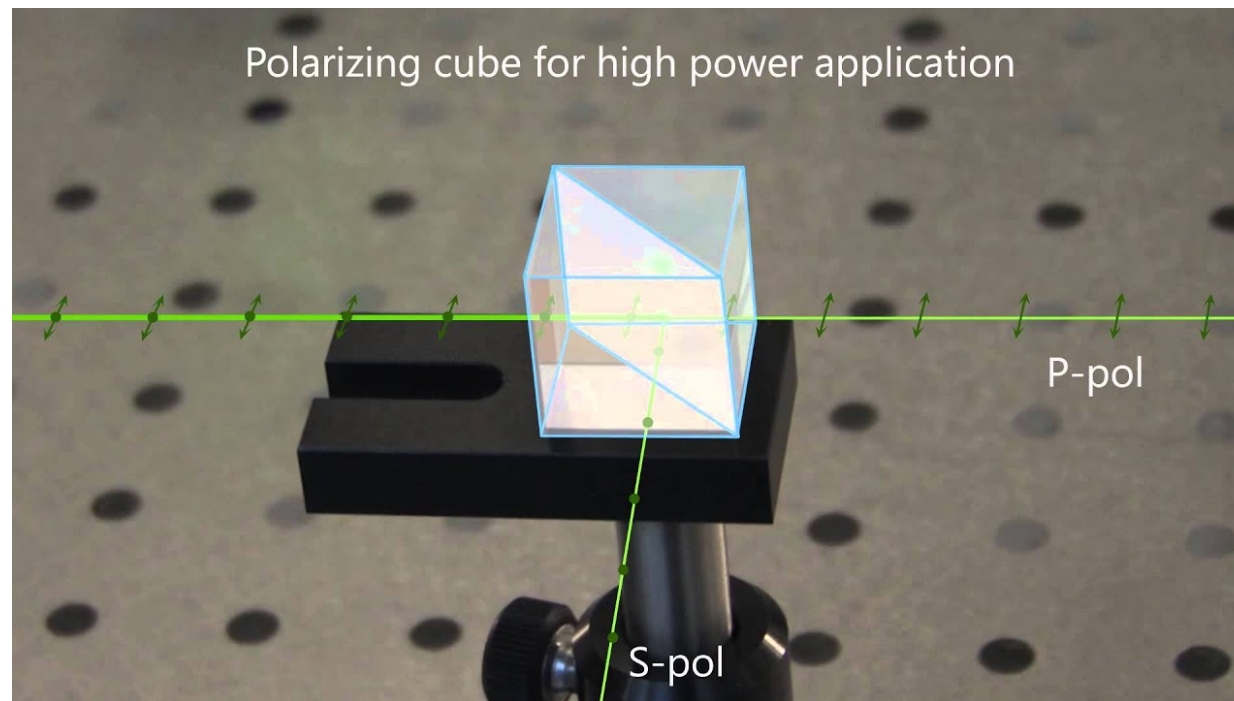


(vision artistique)

modèle quantique
ni particule ni onde

SYMÉTRIE EN OPTIQUE

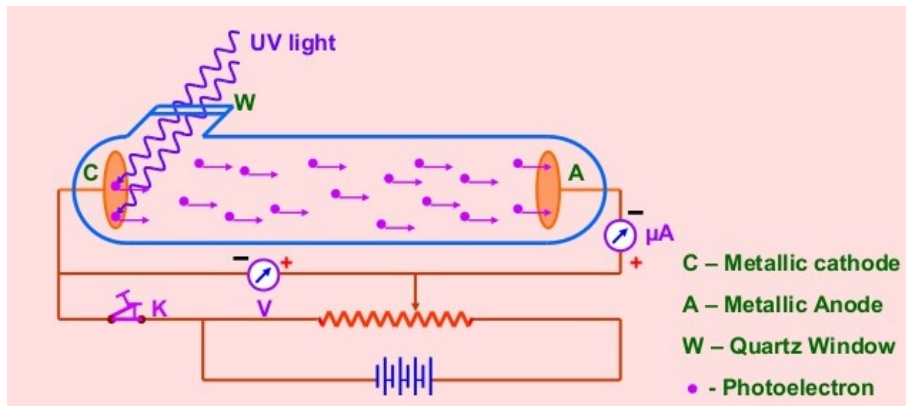
miroir semi-réfléchissant (ou lame séparatrice)



50%

50%

EXISTENCE DES PHOTONS

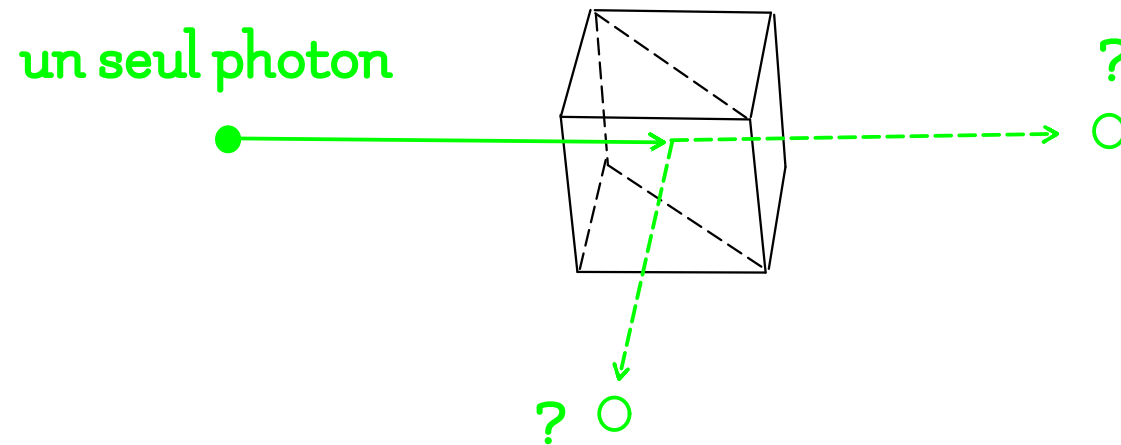


effet photoélectrique



NOTION DE QUANTUM

que se passet-t-il si on envoie un seul photon
sur un miroir semi-réfléchissant ?



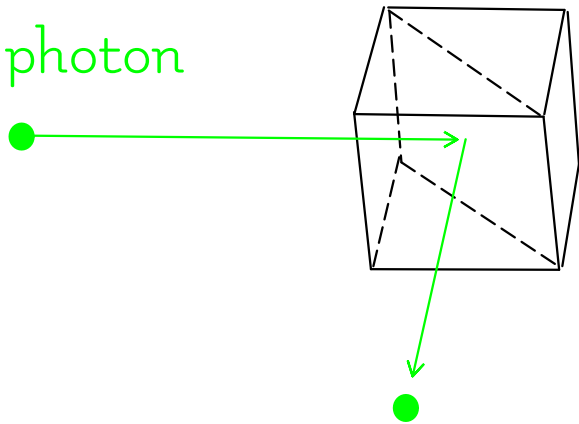
ON NE PEUT PAS DIVISER UN QUANTUM



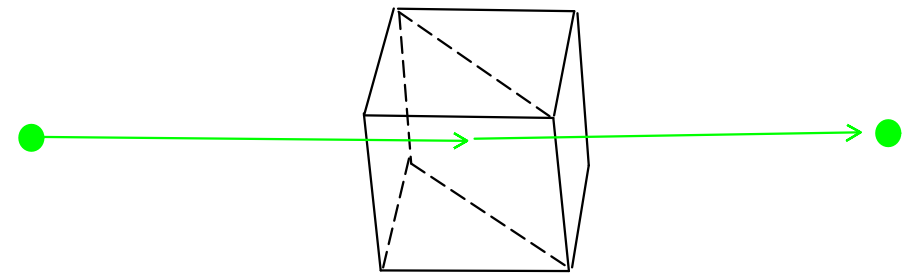
LE HASARD QUANTIQUE

seule possibilité : résultat aléatoire !

un seul photon



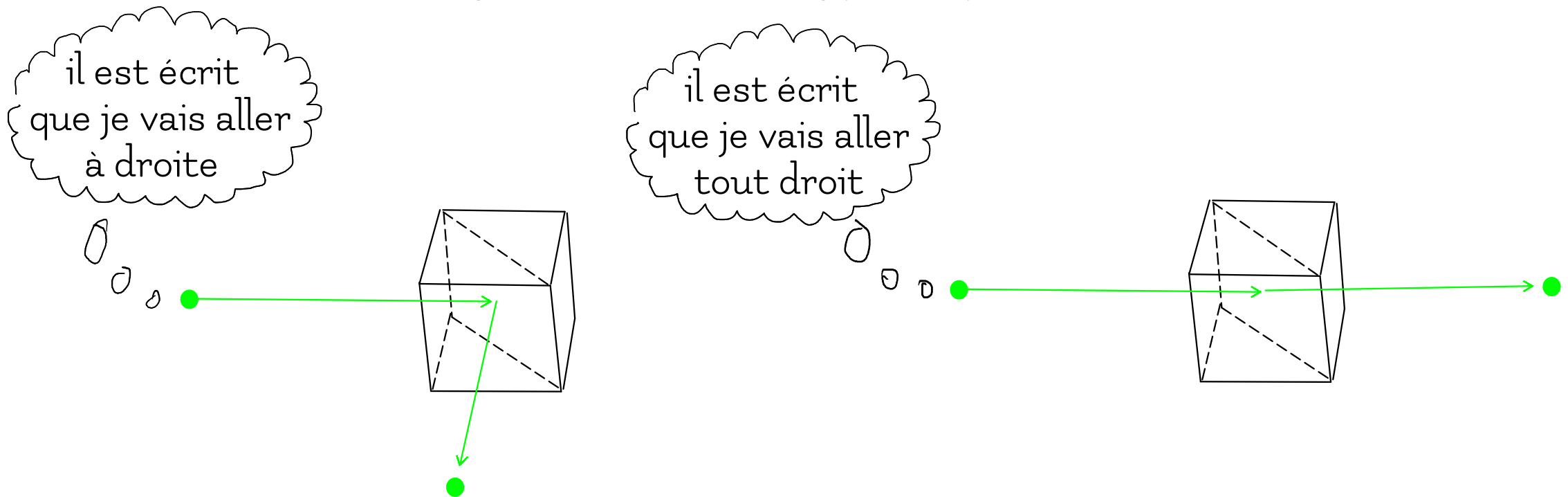
$$p = \frac{1}{2}$$



$$p = \frac{1}{2}$$

QUEL TYPE DE HASARD ?

HASARD LIÉ À L'IGNORANCE ? :
il y aurait alors deux types de photons

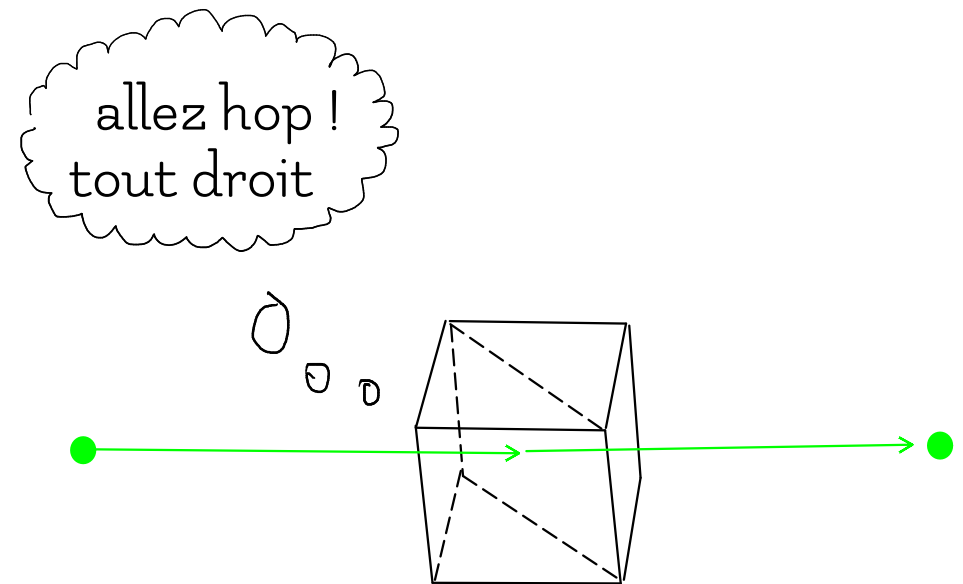
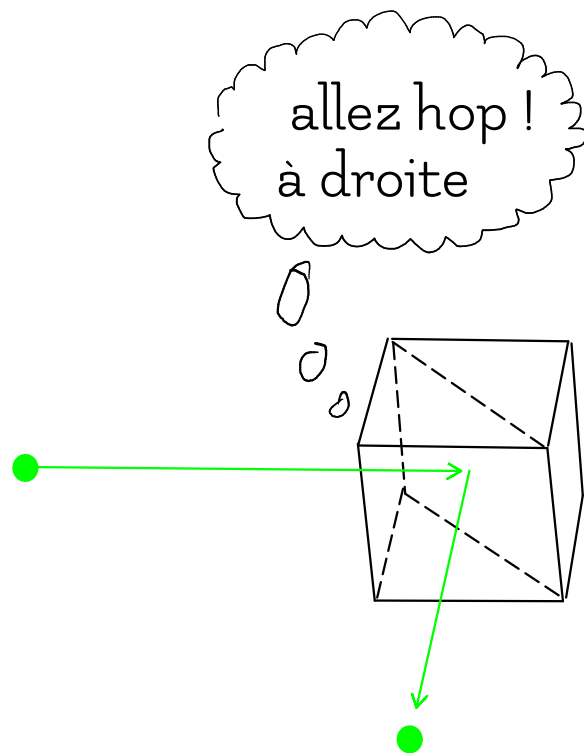


il y aurait autant de photons dans chaque catégorie
le **DÉTERMINISME** est restauré

dieu ne joue pas aux dés



HASARD NON DÉTERMINISTE ? le photon «décide» au dernier moment

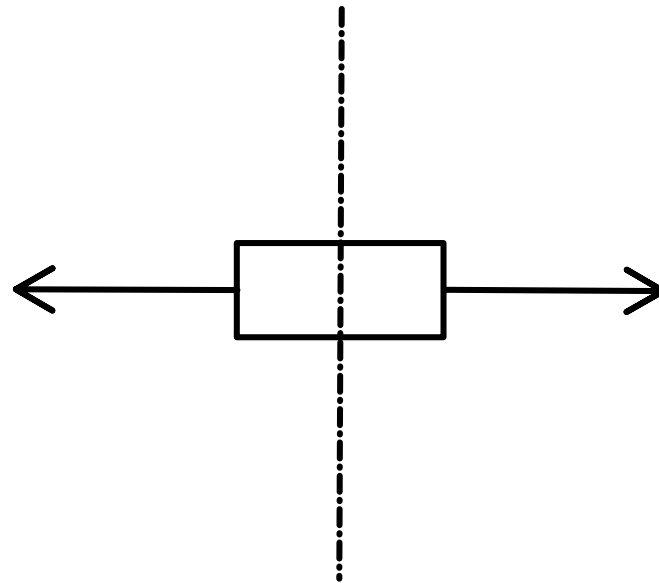


rupture philosophique : **INDÉTERMINISME**
le futur n'est pas écrit à l'avance

si ! dieu joue aux dés



POUR SAVOIR QUI A RAISON, ON VA POUSSER
LE HASARD QUANTIQUE DANS SES RETRANCHEMENTS
EN COUPLANT SYMÉTRIES ET LOIS DE CONSERVATION



CONSERVATION DE LA QUANTITÉ DE MOUVEMENT

roue libre

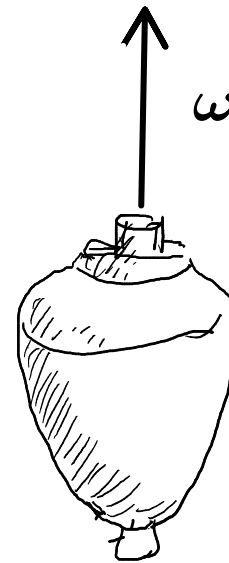


tictictictictictictictictictictictictictictictictictic

$\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ est constant

CONSERVATION DU MOMENT CINÉTIQUE

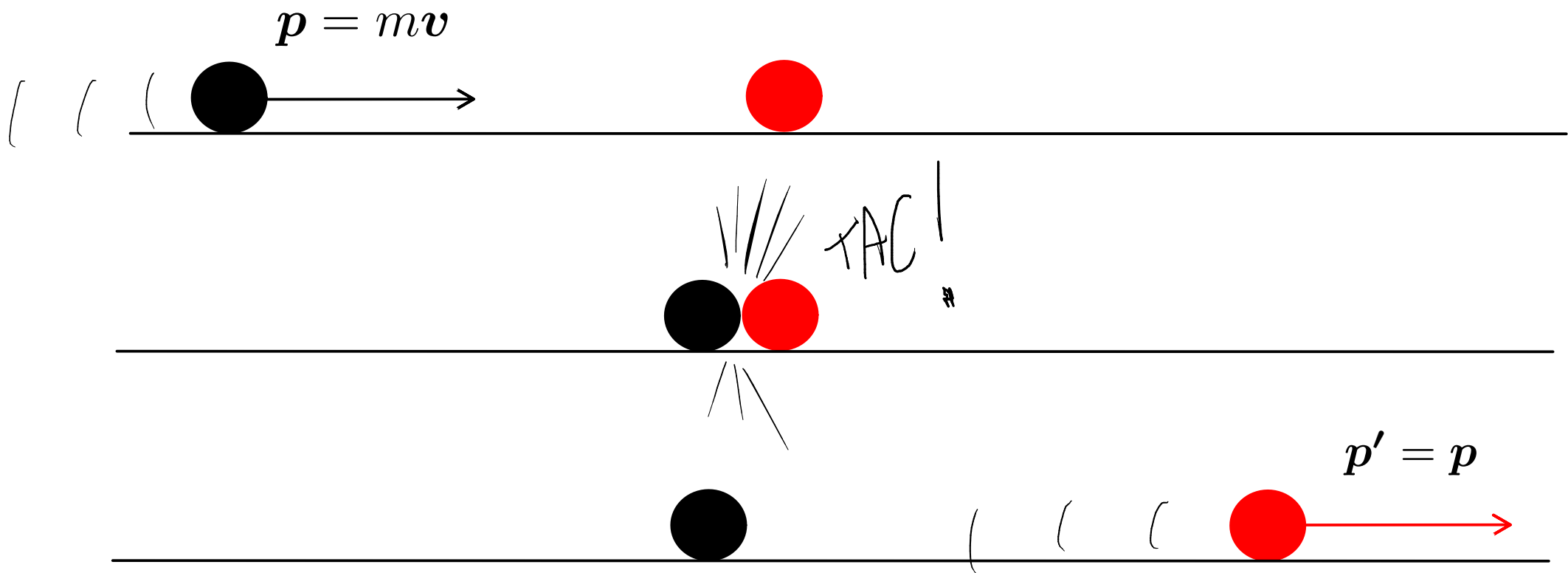
«conservation de la quantité de rotation»



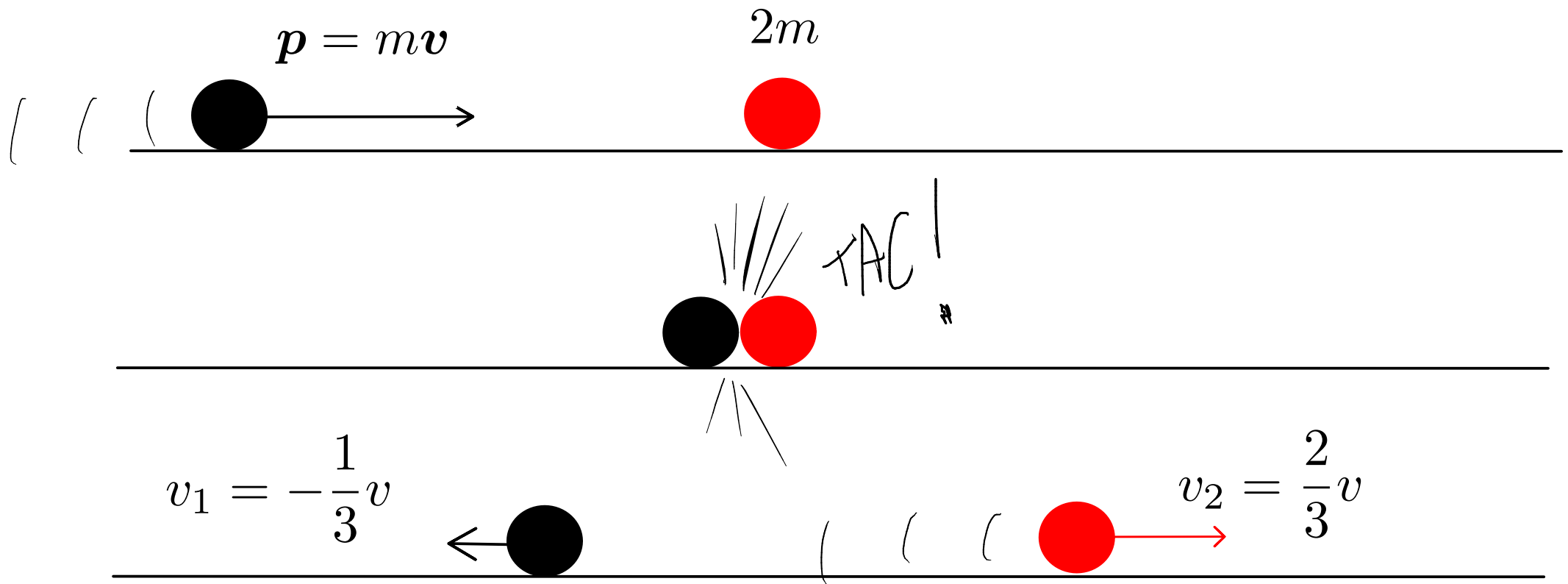
$$L = I\omega$$

CONSERVATION COLLECTIVE DE LA QUANTITÉ DE MOUVEMENT

au cours d'un choc ...

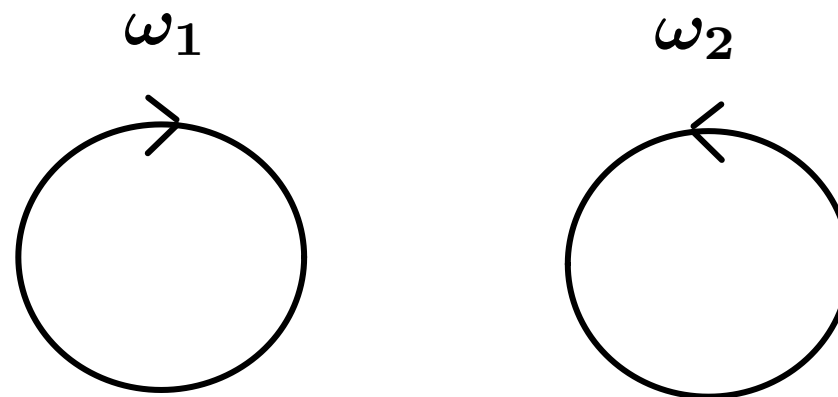


QUANTITÉ DE MOUVEMENT $\neq$ VITESSE



$$m \left(-\frac{1}{3}v \right) + 2m \left(\frac{2}{3}v \right) = mv$$

CONSERVATION GLOBALE DU MOMENT CINÉTIQUE



$$I\omega_1 + I\omega_2 = 0$$

le moment angulaire total
est conservé au cours du temps

CRYSTAL B.B.O.

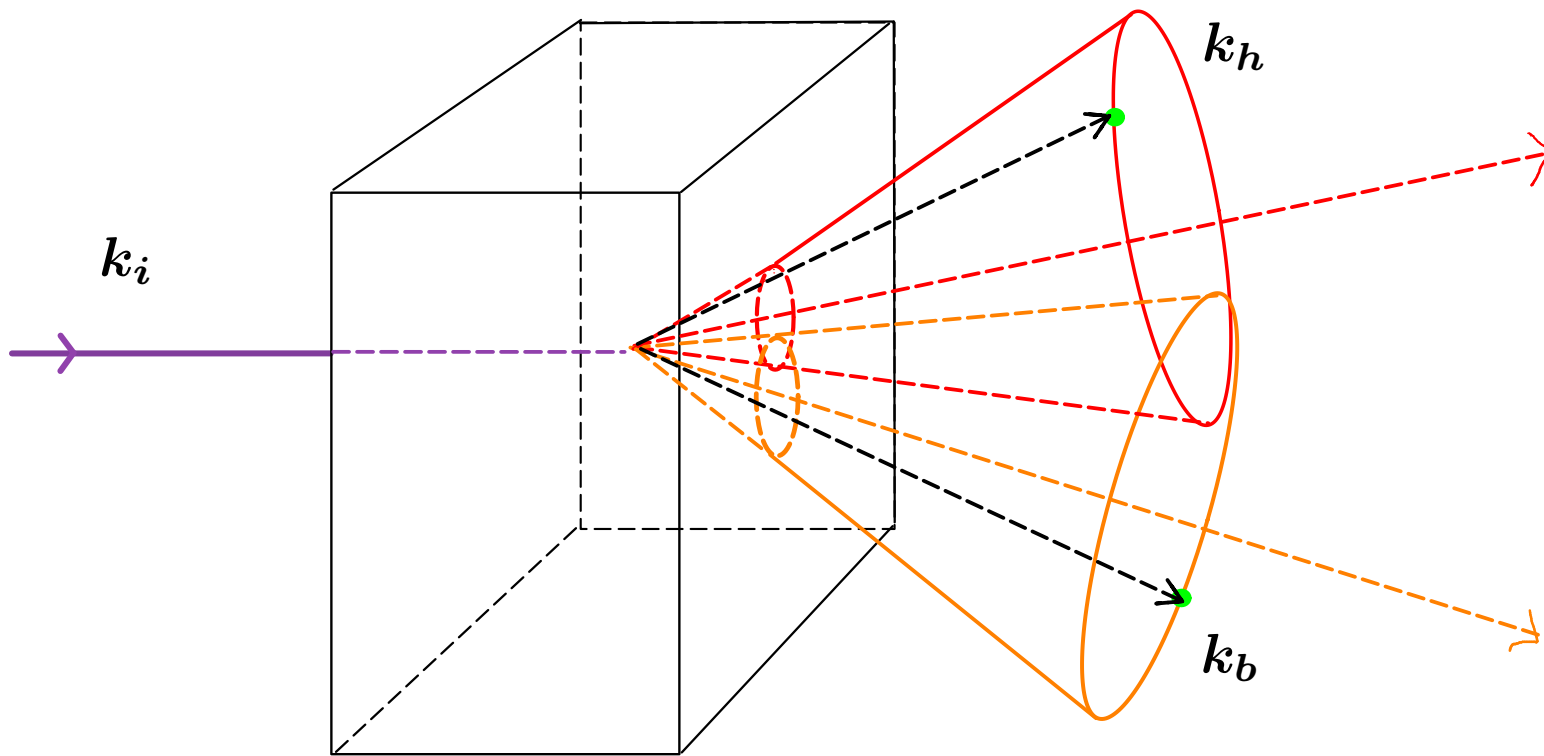
Bêta-Borate de Baryum



doublement de photons :

création de paires de photons jumeaux

PAIRES DE PHOTONS



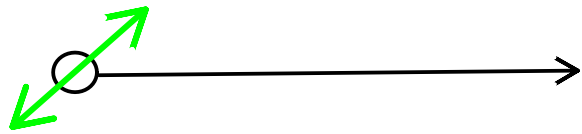
$$k_i = k_h + k_b$$

quantité de mouvement

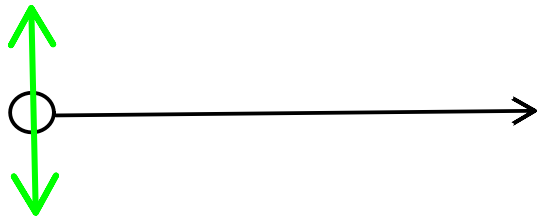
$$h\nu = h \frac{\nu}{2} + h \frac{\nu}{2}$$

énergie

UN PHOTON PEUT ÊTRE POLARISÉ



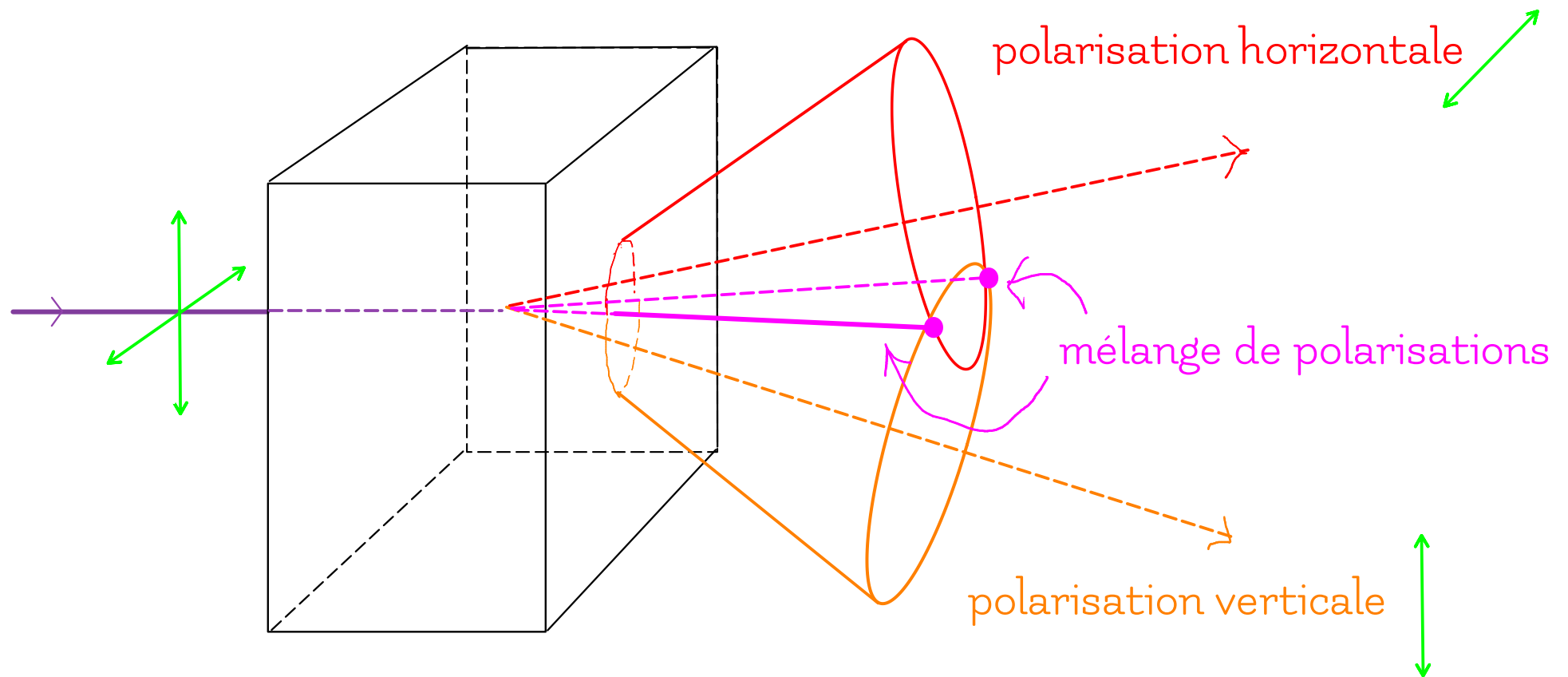
photon polarisé Horizontalement



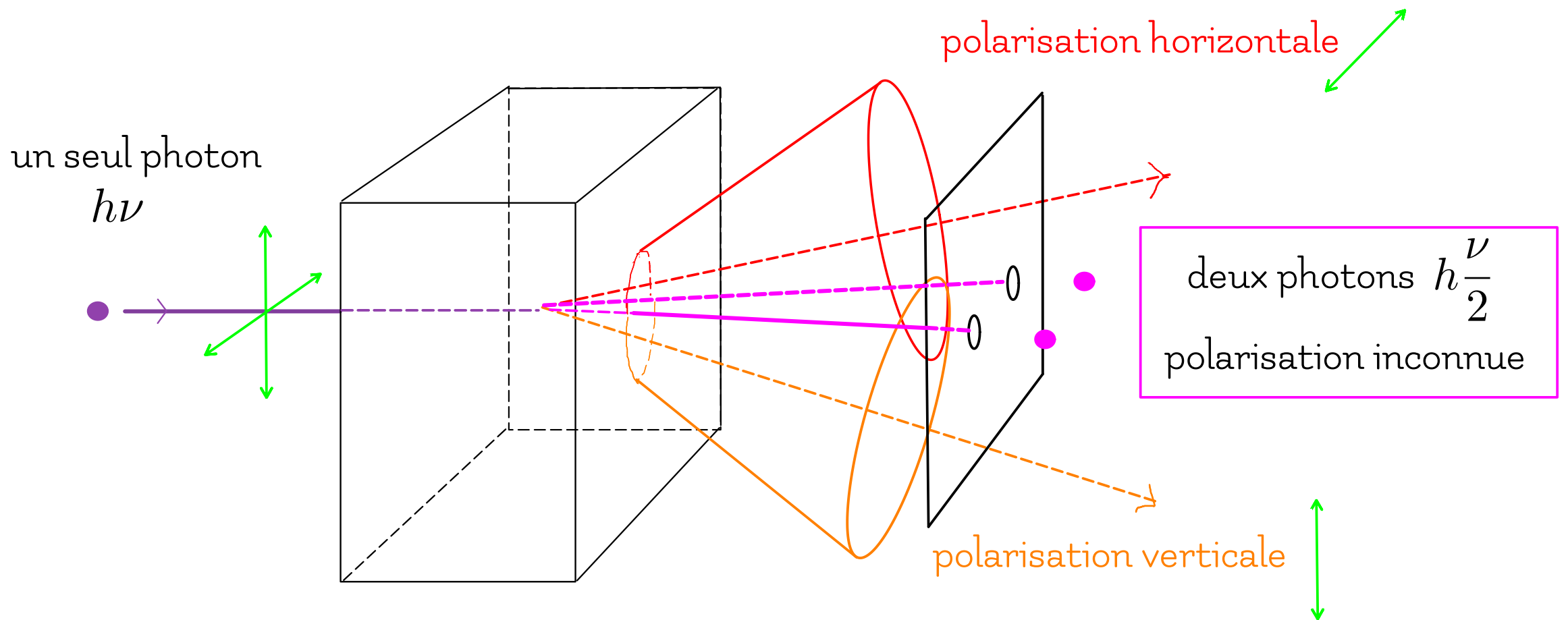
photon polarisé Verticalement



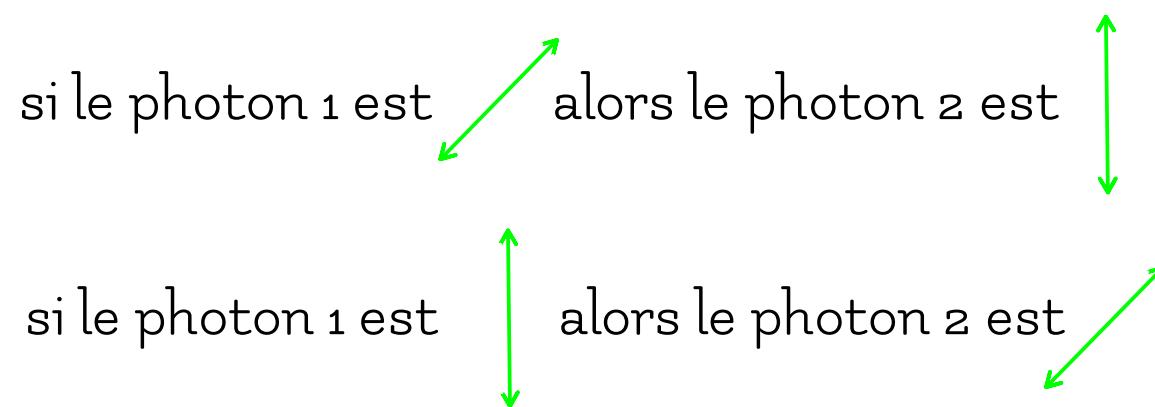
PAIRES DE PHOTONS POLARISÉS DE MANIÈRE «INTRIQUÉE»



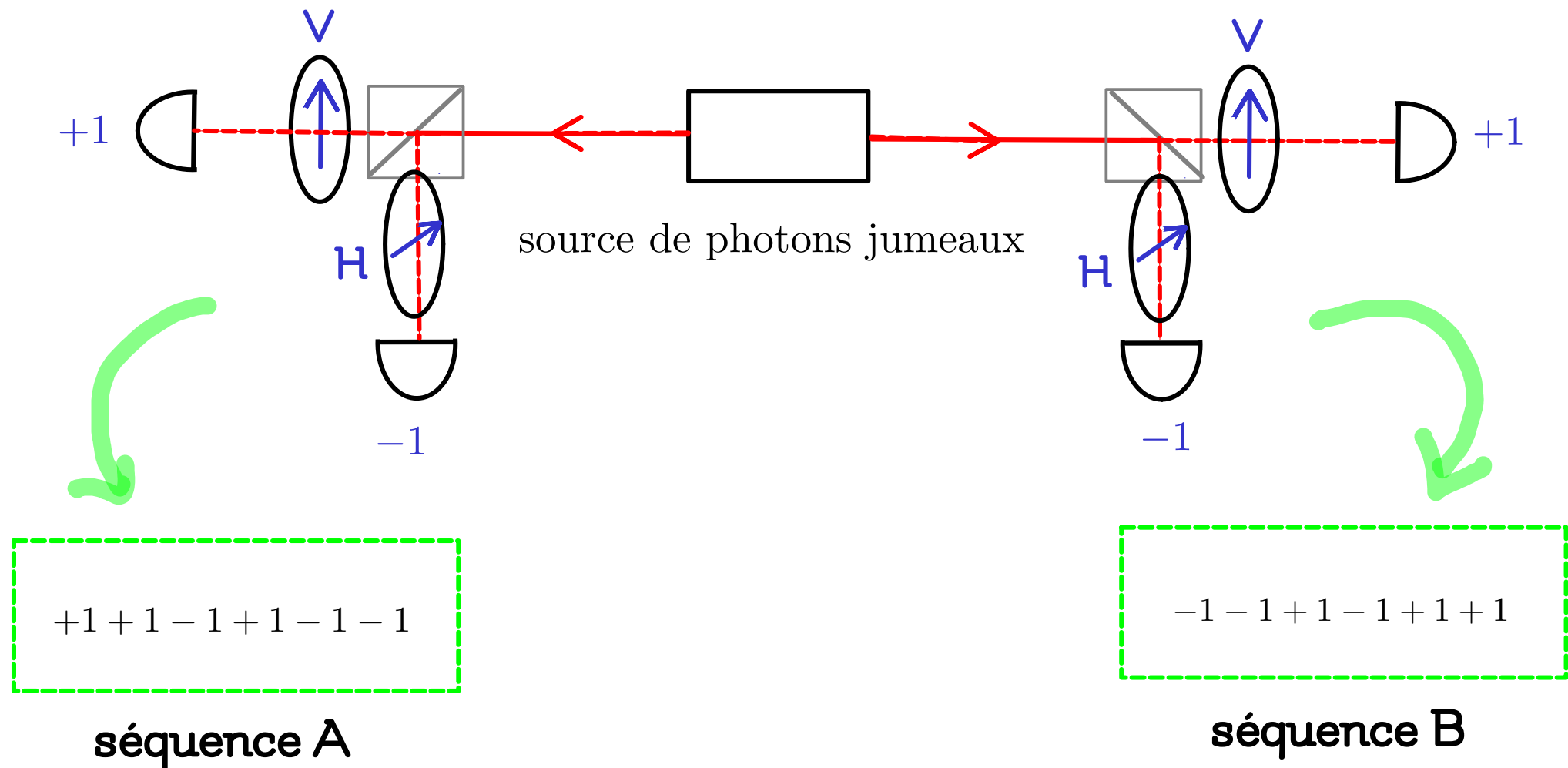
PHOTONS SÉLECTIONNÉS



loi de conservation :



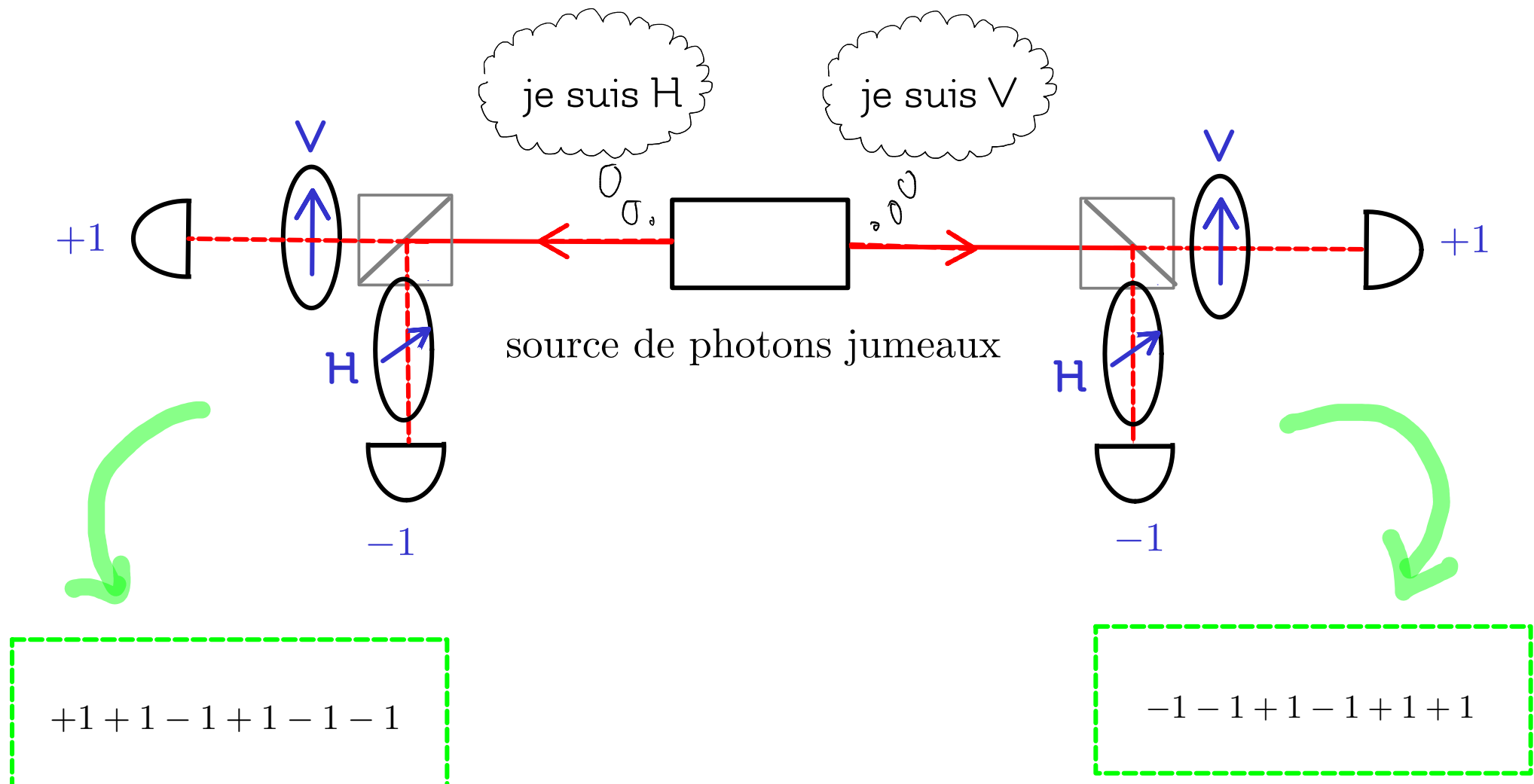
DÉTECTEURS DE POLARISATION



HASARD CORRÉLÉ

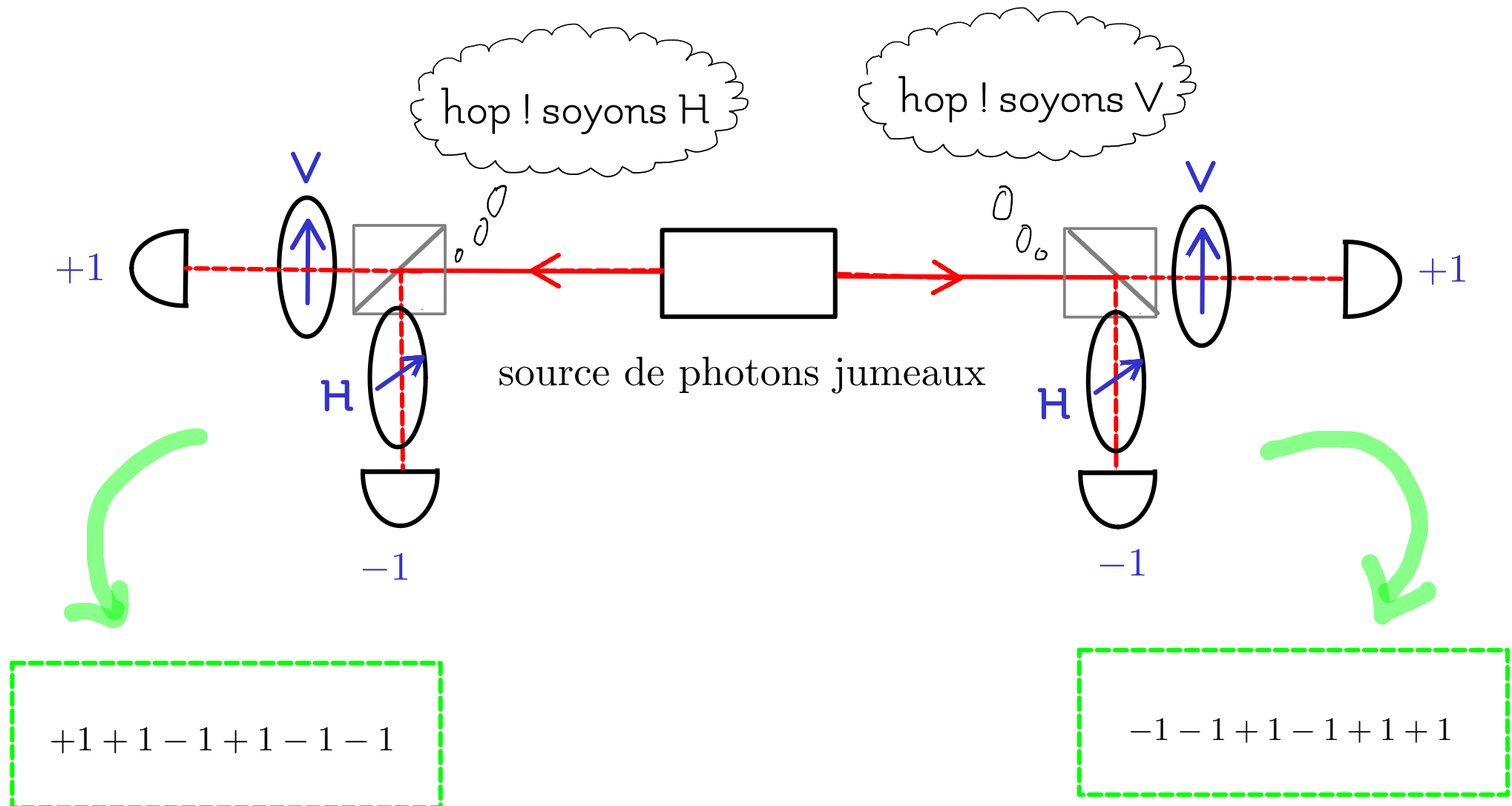
TYPE DE HASARD ?

modèle 1 : déterminisme + ignorance ?



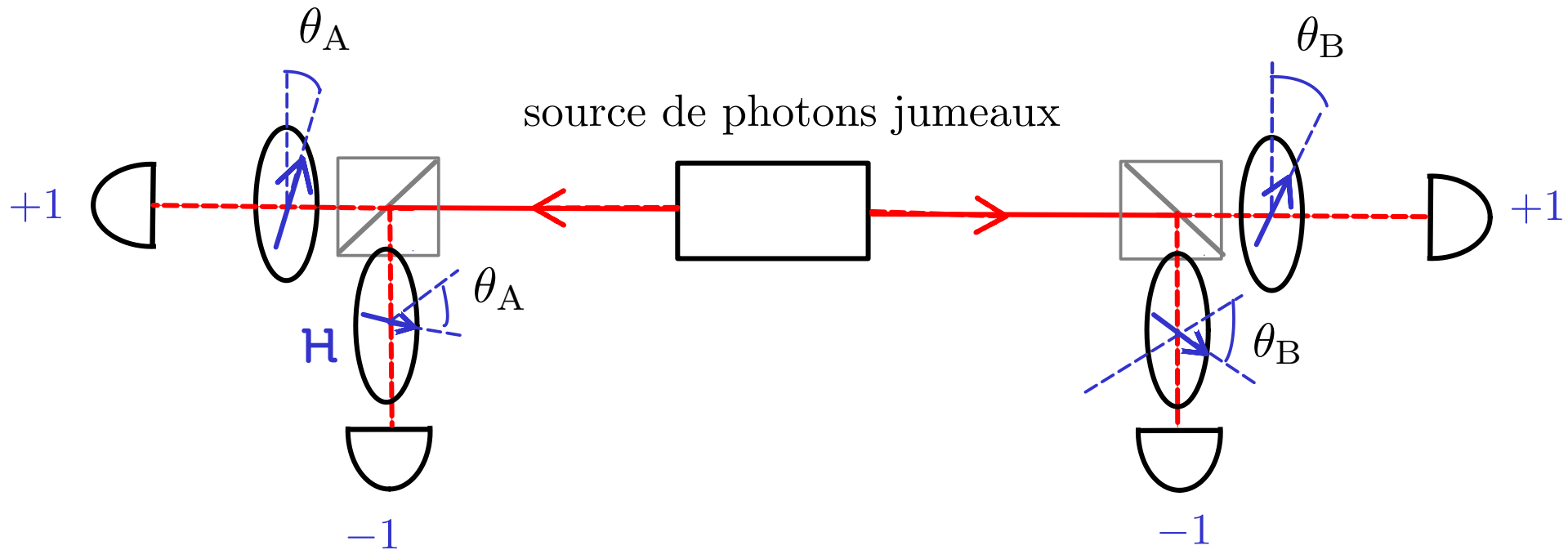
TYPE DE HASARD ?

modèle 2 : indéterminisme



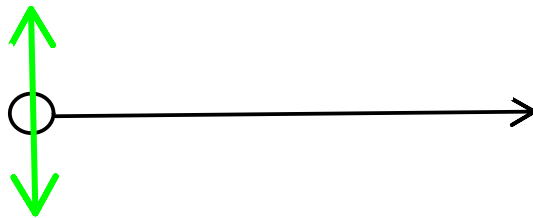
COMMENT FAIRE LA DIFFÉRENCE ENTRE LES DEUX TYPES DE HASARD?

→ on fait tourner les détecteurs



LOI DE MALUS

photon polarisé Verticalement



passe avec une probabilité

$$p = (\cos \theta)^2$$

ne passe pas avec une probabilité

$$p = (\sin \theta)^2$$

+1



+1

$$p = (\cos \theta)^2$$

-1

$$p = (\sin \theta)^2$$

STATISTIQUES DU HASARD DÉTERMINISTE

H

$$+1 \quad p = (\cos \theta_A)^2$$

$$-1 \quad p = (\sin \theta_A)^2$$

V

$$+1 \quad p = (\sin \theta_A)^2$$

$$-1 \quad p = (\cos \theta_A)^2$$

V

$$+1 \quad p = (\cos \theta_B)^2$$

$$-1 \quad p = (\sin \theta_B)^2$$

H

$$+1 \quad p = (\sin \theta_B)^2$$

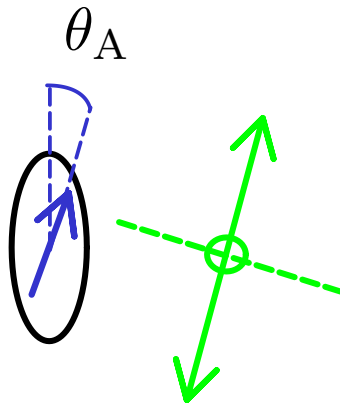
$$-1 \quad p = (\cos \theta_B)^2$$

$$A = +1 \quad B = -1 \quad \text{avec probabilité} \quad p = (\cos \theta_A)^2 (\sin \theta_B)^2 + (\sin \theta_A)^2 (\cos \theta_B)^2$$

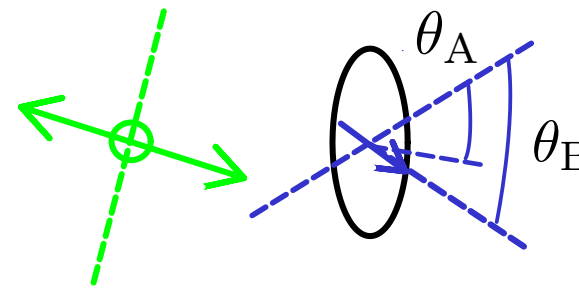
STATISTIQUES EXPÉRIMENTALES

$$A = +1 \quad B = -1 \quad \text{avec probabilité} \quad p = (\cos(\theta_B - \theta_A))^2$$

comme si



un des photons choisissait
spontanément une des orientations
(A ou B)

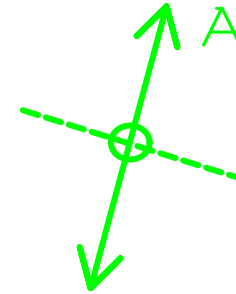


et l'autre photon était détecté
selon la loi de Malus
comme s'il était orthogonal au
premier

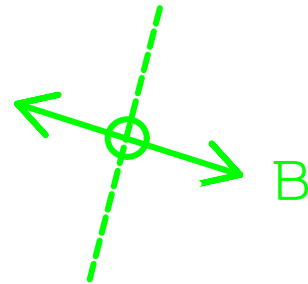
INTERPRÉTATION DES STATISTIQUES EXPÉRIMENTALES

il semble que :

le photon A choisit sa polarisation au dernier moment



le photon B, par la loi de conservation, adopte une polarisation orthogonale

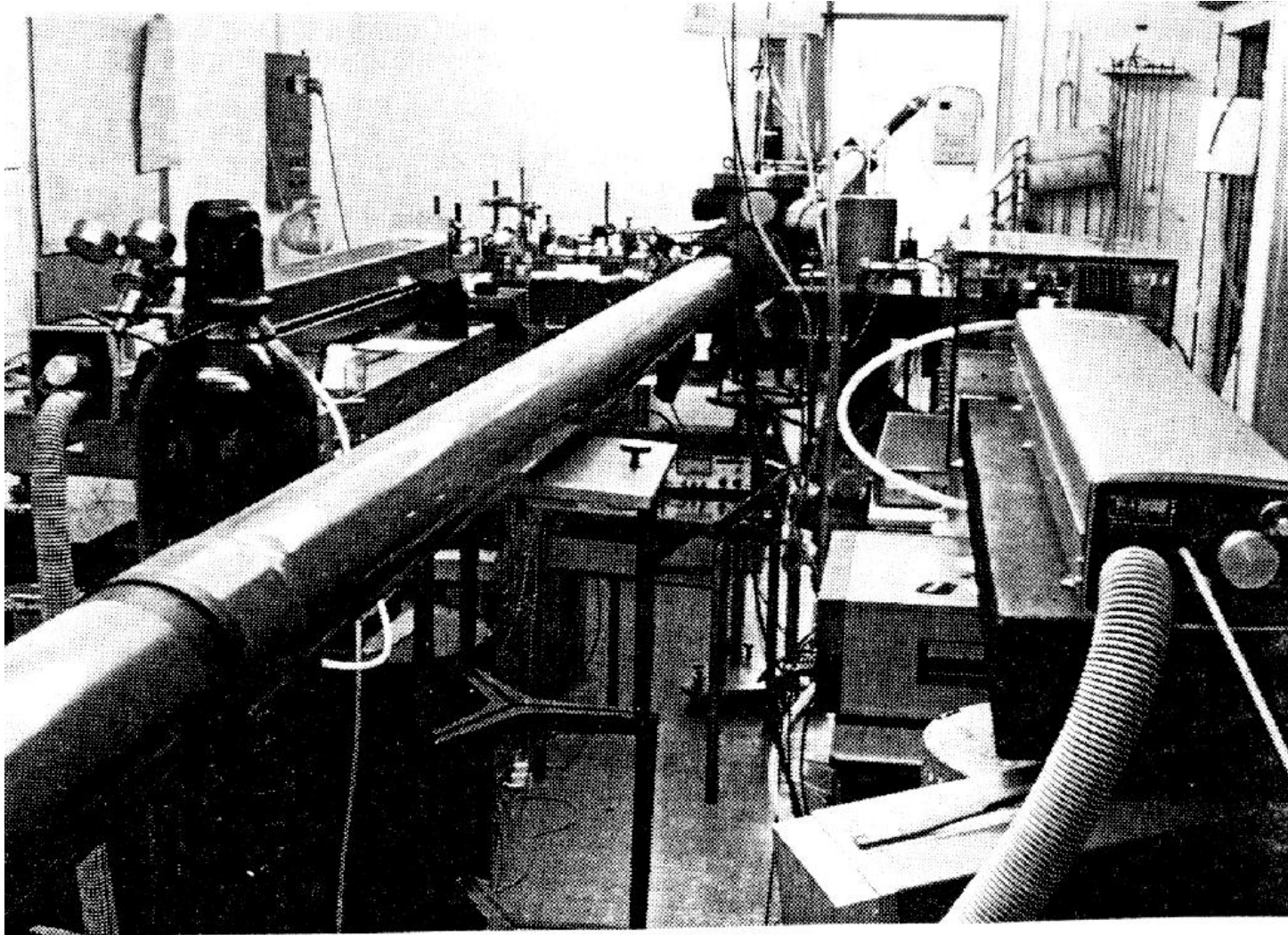


SPOOKY ACTION AT A DISTANCE



les photons se comportent comme s'il y
avait une concertation à distance
au dernier moment

EXPÉRIENCE D'ALAIN ASPECT^(★)



(★) prix Nobel 2022

CONCLUSIONS

mécanique quantique -> hasard non déterministe

compatible avec le libre arbitre
(c'est à dire l'existence d'un choix)