

Photons, physique quantique et philosophie

Alexia Auffèves, Physicienne
Institut Néel - CNRS

Collaboration:

P. Grangier (Physicien, Institut d'Optique, Palaiseau)

N. Farouki (Philosophe, CEA Grenoble)

Atelier de l'Information, Grenoble, 6 octobre 2015

Questions

- => Qu'est ce qu'un état quantique?
- => Pourquoi la réalité quantique est « bizarre » = inhabituelle?
- => Peut on construire sur cette bizarrerie?

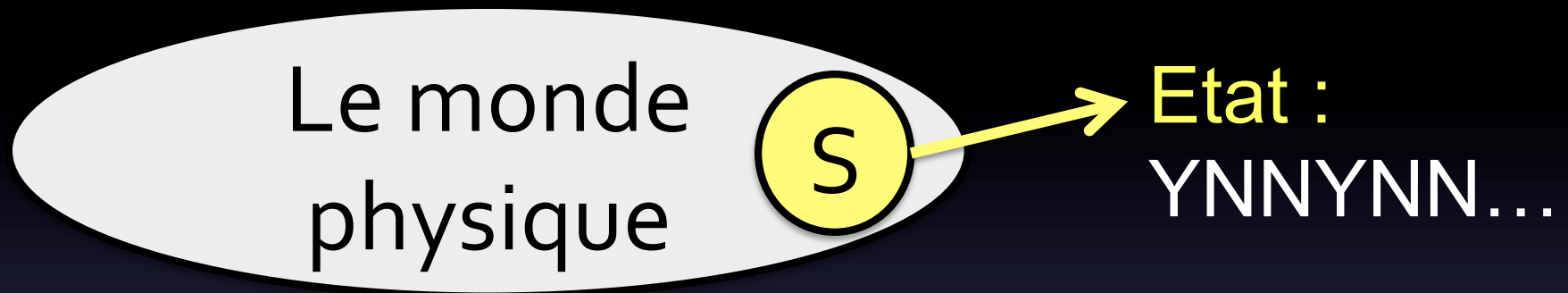
Qu'est ce qu'un état physique? (*en physique classique*)

Le monde
physique



Un **état physique** caractérise un **système physique** = une entité isolable dans le monde physique = le monde naturel = la nature

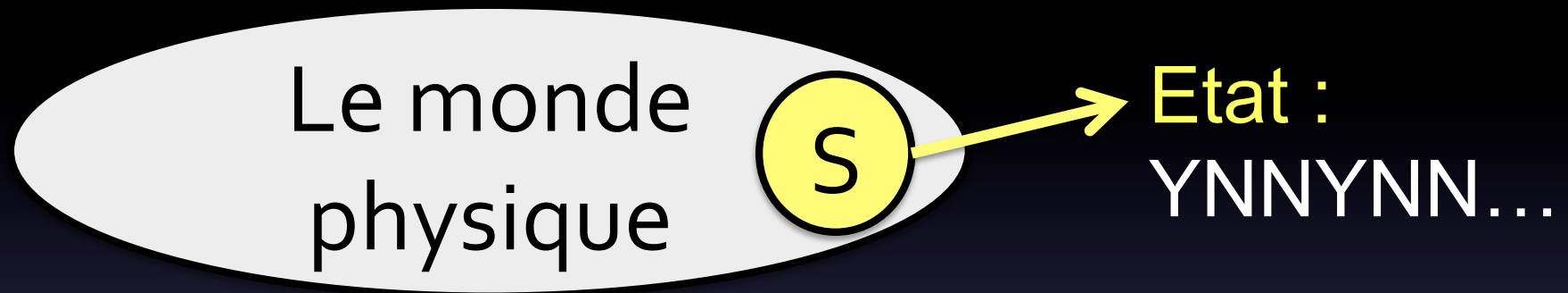
Un modèle d'état physique (*en physique classique*)



Un état physique = une carte d'identité

- Un ensemble de réponses à un ensemble de questions (quelle est ta masse? Position? Vitesse?...)

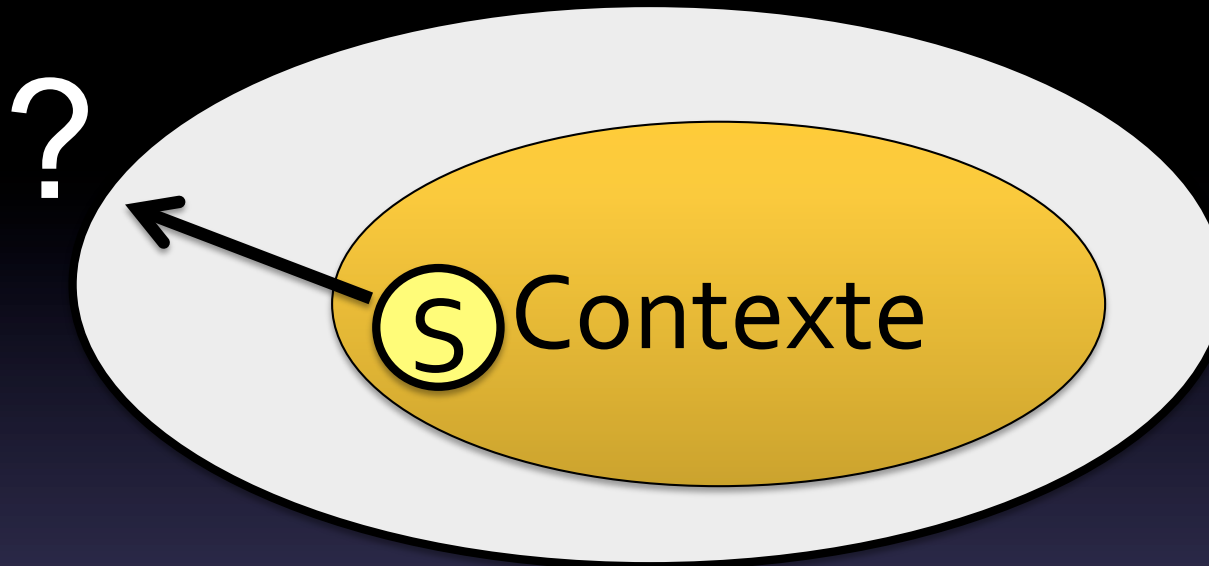
Un modèle d'état physique (en physique classique)



L'état caractérise le système seul, et existe même si personne ne l'observe

⇒ **Condition d'objectivité (croit on)**

Qu'est ce qu'un état physique (*en physique quantique*)?

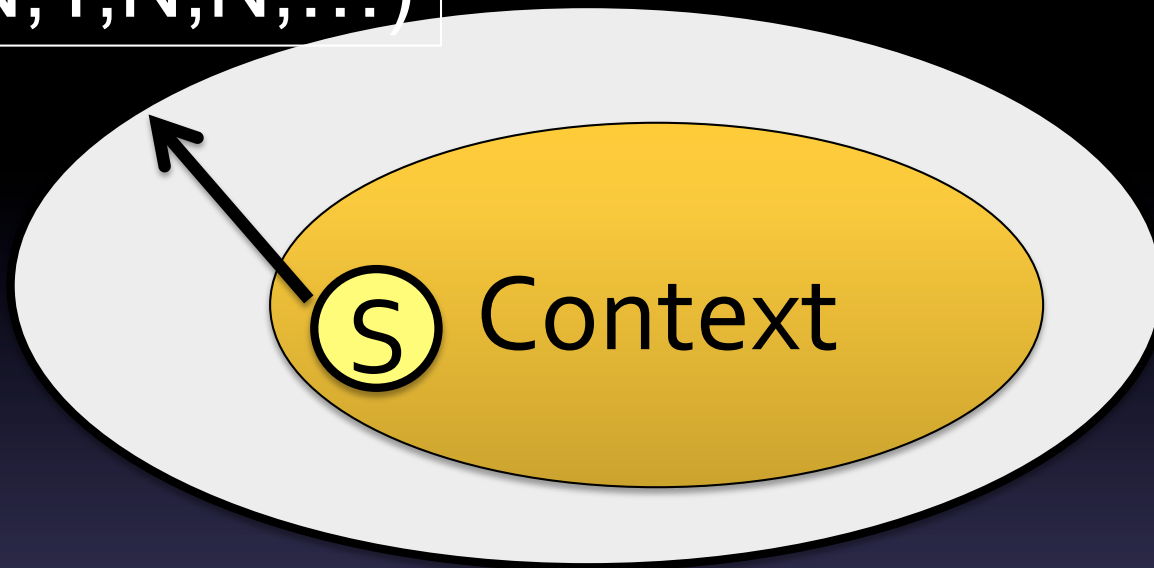


Les systèmes quantiques sont toujours « interfacés » par un contexte (expérimental)

Le contexte interagit avec le système

⇒ **Comment accéder à l'état physique du système?**

Qu'est ce qu'un état physique (*en physique*
quantique)?
 $P(Y,N,N,Y,N,N,\dots)$



Perturbation aléatoire induite par l'interaction
the système-contexte **On n'a pas accès à la CI**
⇒ Description **probabiliste** de l'état du
système : la « fonction d'onde »

« Realisme » vs « anti-réalisme »

- l'état physique total = l' « état classique » existe, mais n'est pas accessible pour **raisons pratiques**
- La théorie quantique est **incomplète**
- Les probabilités sont dues à l'**ignorance** d'une réalité sous jacente

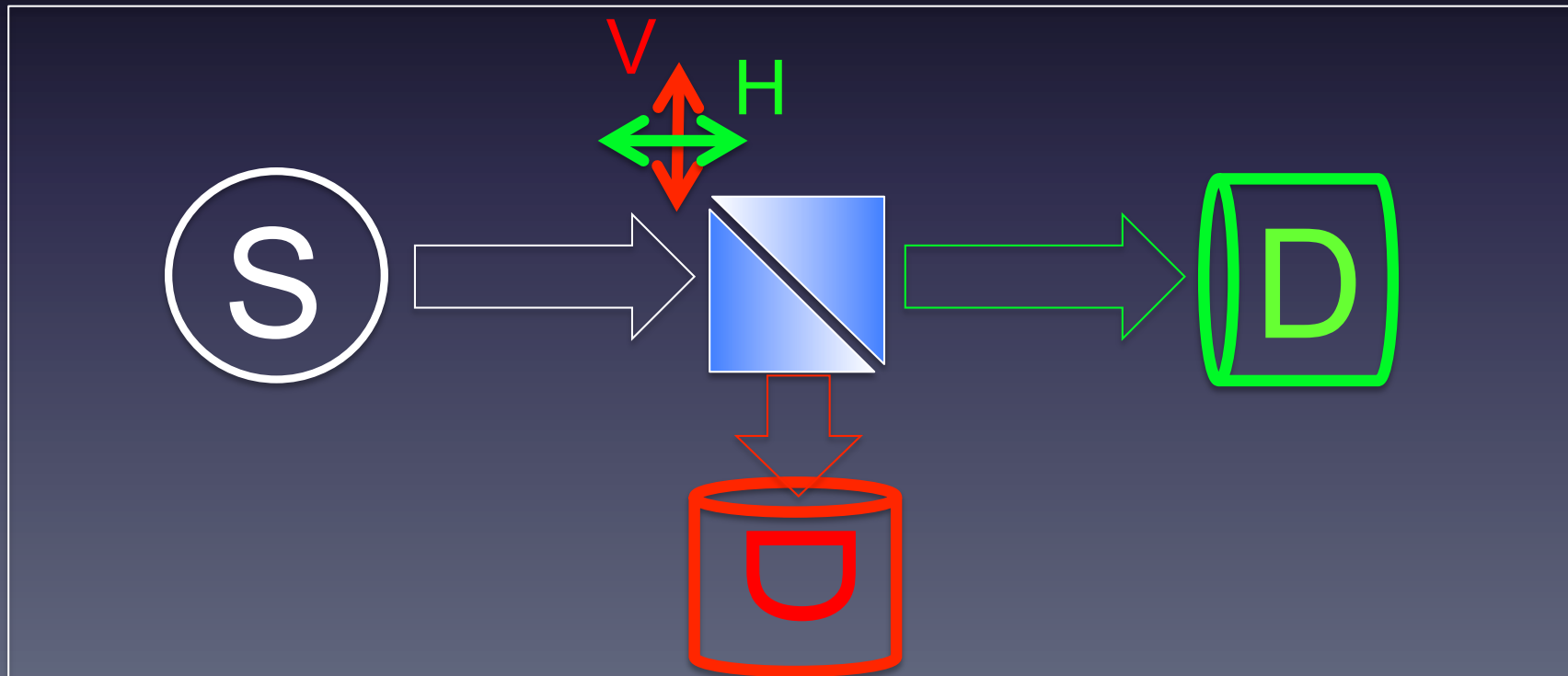
- L'état classique n'est pas accessible pour des **raisons irréductibles**
- ⇒ L'état classique n'existe pas
- ⇒ **La théorie quantique est complète**
- La description d'un système ne peut pas être plus précise que la fonction d'onde

Polarisation de la lumière classique

Analyse avec un cube polariseur d'axes neutres
{H,V}

=> la lumière H-polarisée est **transmise**

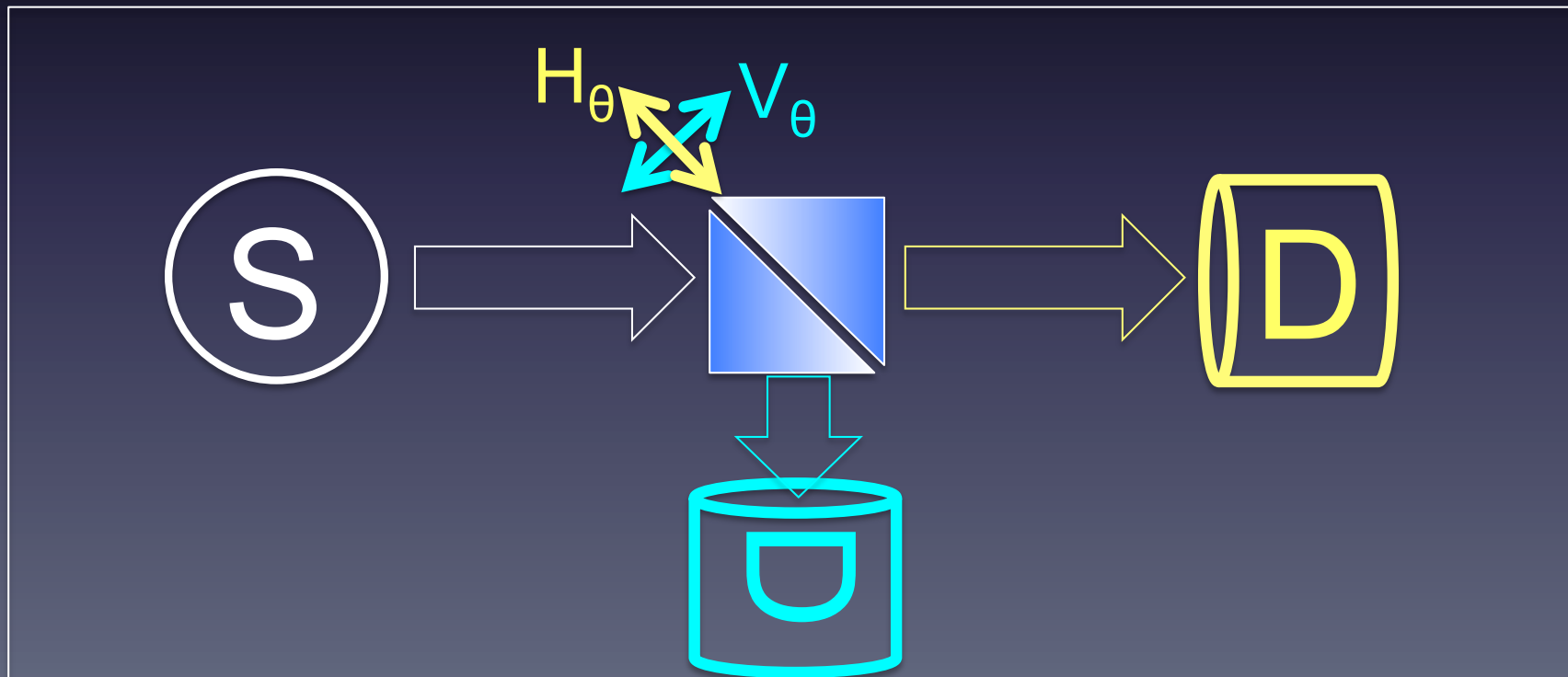
=> la lumière V-polarisée est **réfléchi**



Polarisation de la lumière classique

Rotation des axes neutres: analyse de la polarisation dans la base $\{H_\theta, V_\theta\} \Rightarrow$ coefficients de transmission et de réflexion $T(\theta), R(\theta)$

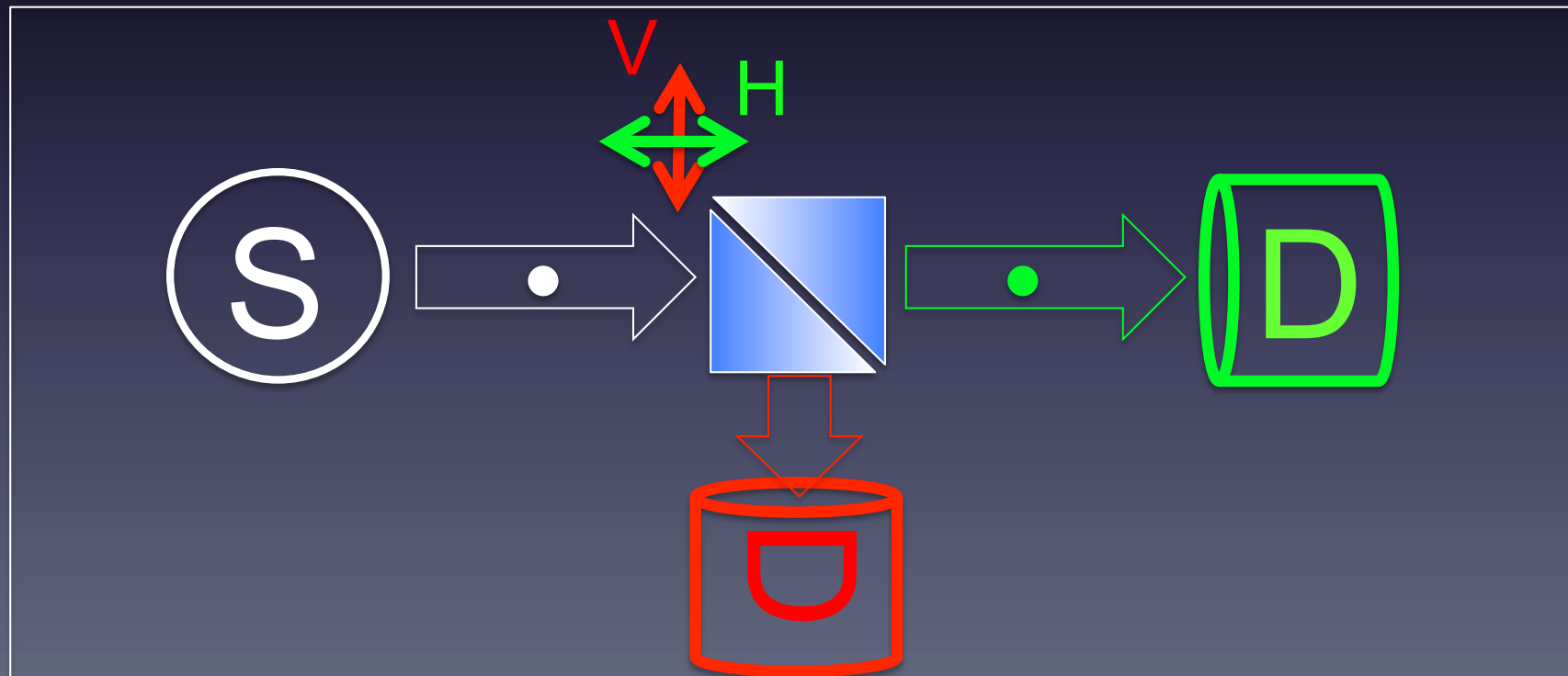
Définition: la lumière est polarisée H_θ si $T(\theta)=1$



Polarisation d'un photon unique

Définition : « Le photon est polarisé H » = « l'état quantique du photon est $|H\rangle$ » =

Si on mesure le photon dans la base $\{H,V\}$, le photon est transmis avec certitude

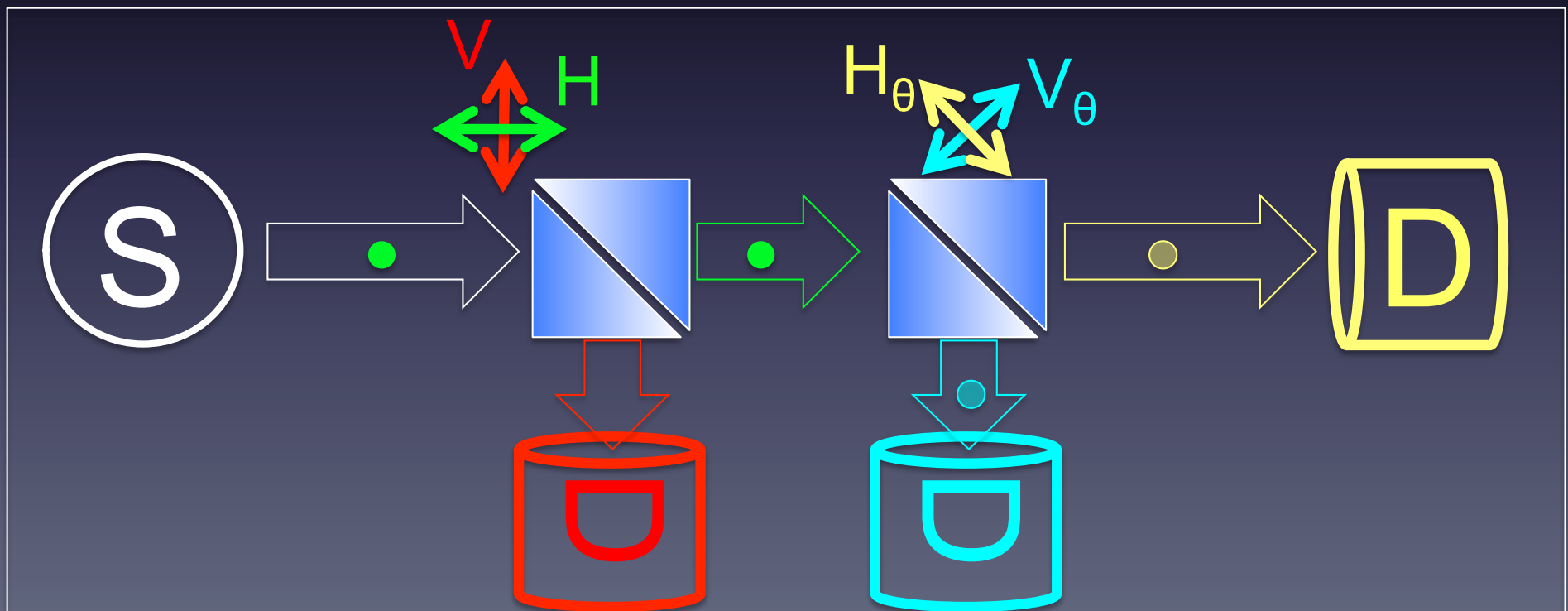


La réalité quantique est aléatoire

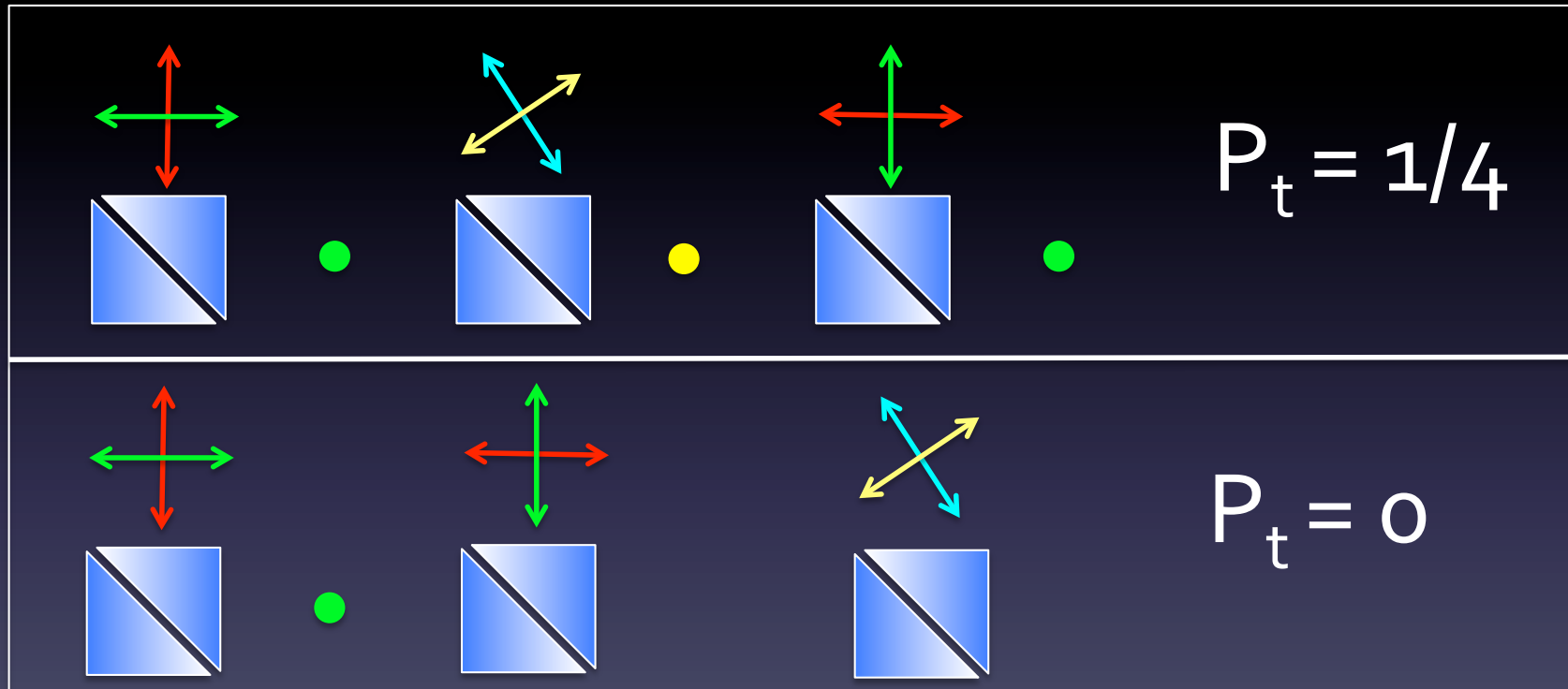
⇒ Prenez un photon dans l'état $|H\rangle$ et mesurez le dans la base $\{H_\theta, V_\theta\}$

⇒ Résultat probabiliste : $P_t(\theta) = \cos^2(\theta)$, $P_r(\theta) = \sin^2(\theta)$

⇒ Quantification de la loi de Malus = Règle de Born



En MQ, les mesures ne commutent pas



L'ordre des questions est très important en MQ

La réalité quantique est « bizarre »

- ⇒ Les résultats de mesure peuvent être aléatoires même si le système se trouve dans un état bien défini
- ⇒ L'ordre des mesures est déterminant = change les résultats de mesure obtenus

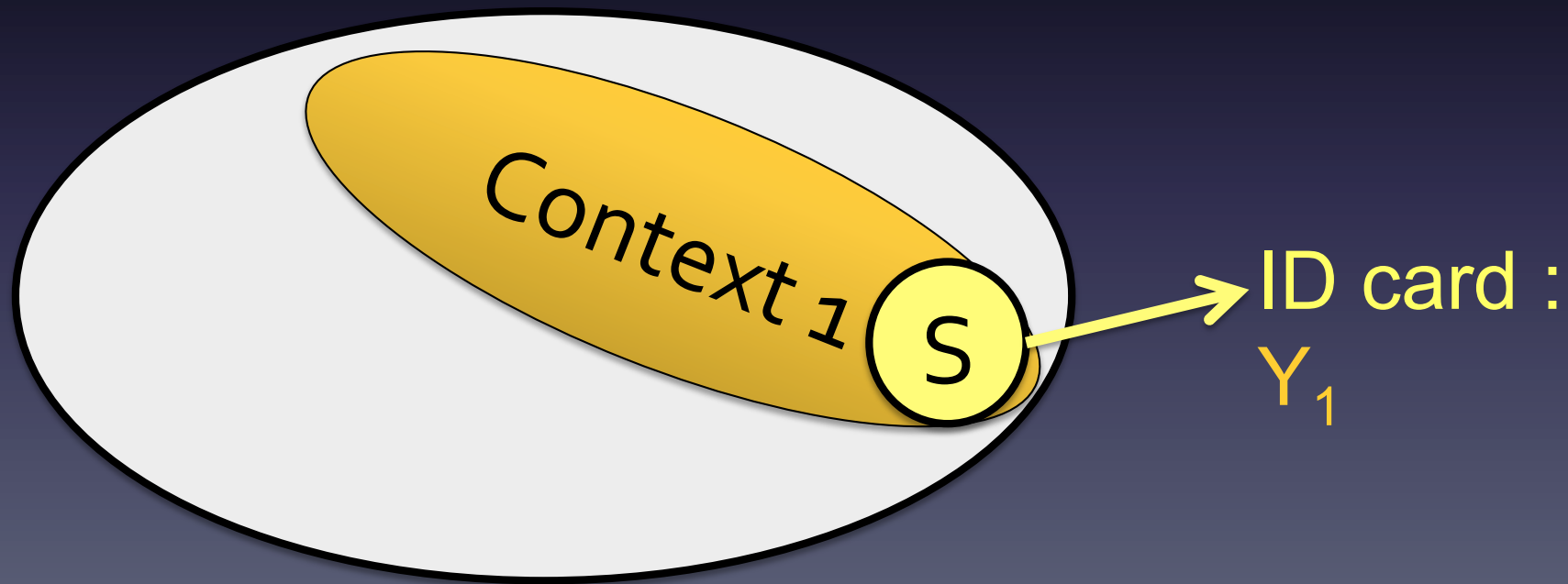
Pourquoi est-ce bizarre à nos yeux?

⇒ **C'est une habitude qui vient de notre monde habituel, quotidien, classique**

Généalogie d'un état classique

Approche opérationnelle: on construit un état, en posant des questions au système pour remplir sa « carte d'identité »

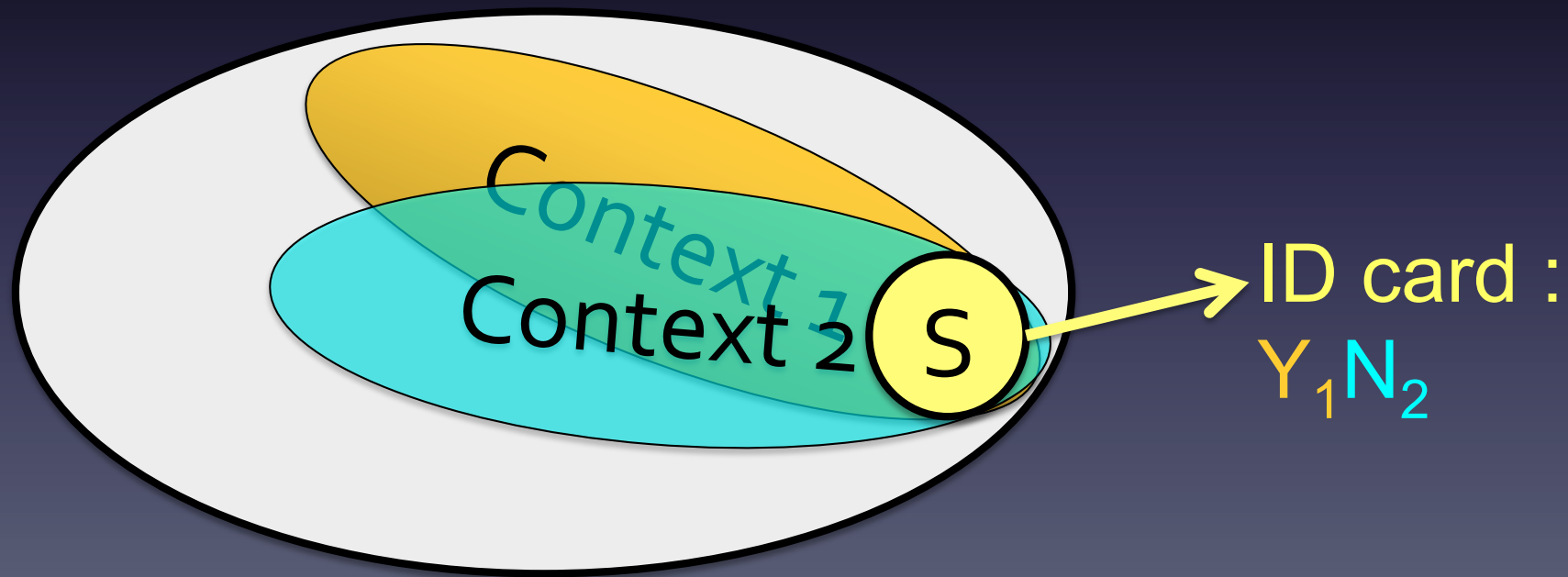
Chaque question est posée dans un certain contexte



Généalogie d'un état classique

Approche opérationnelle: on construit un état, en posant des questions au système pour remplir sa « carte d'identité »

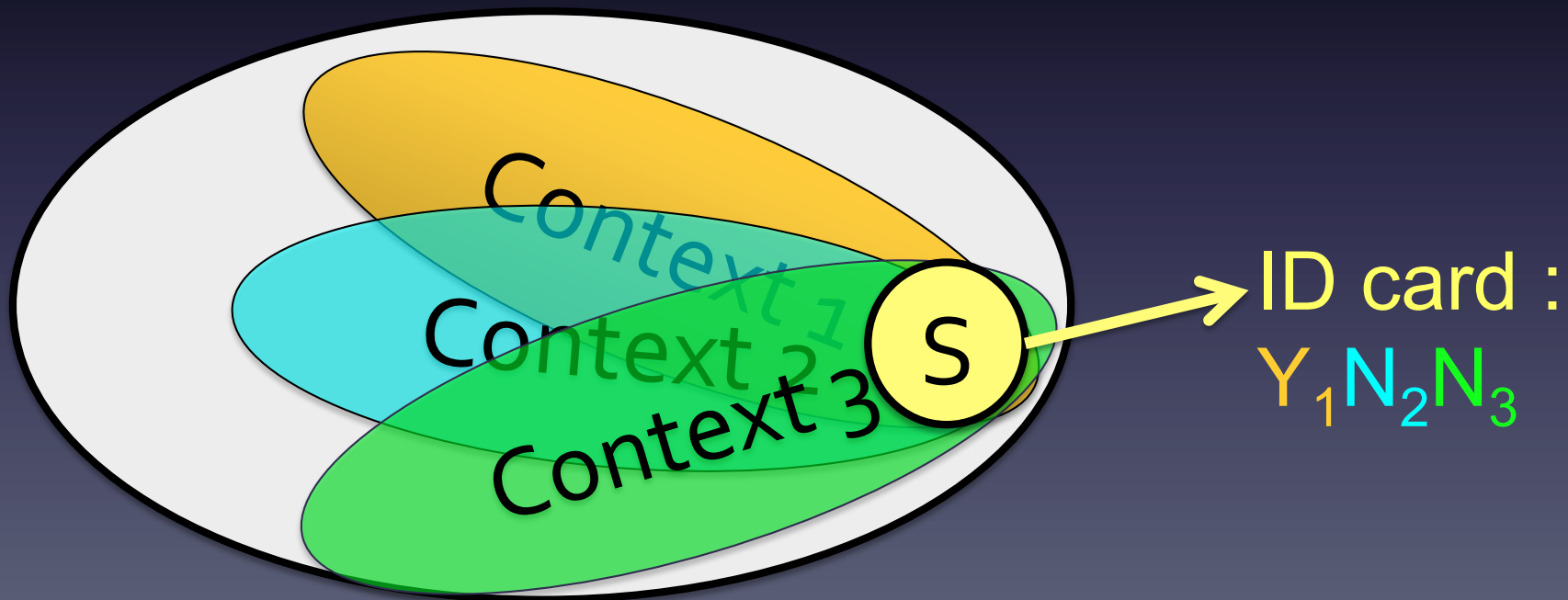
Chaque question est posée dans un certain contexte



Généalogie d'un état classique

Approche opérationnelle: on construit un état, en posant des questions au système pour remplir sa « carte d'identité »

Chaque question est posée dans un certain contexte

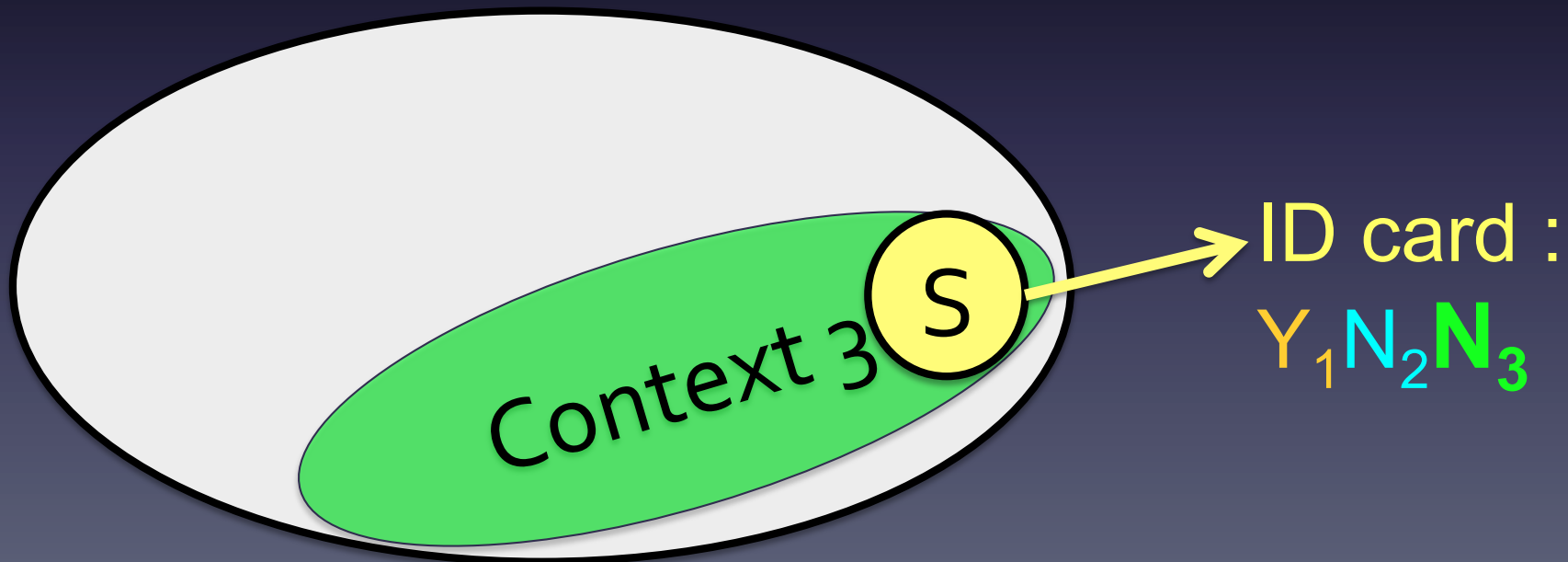


Généalogie d'un état classique

Observation du monde classique

(« Phénoménologie classique »):

J'obtiens **de façon répétée** les mêmes réponses
aux mêmes questions

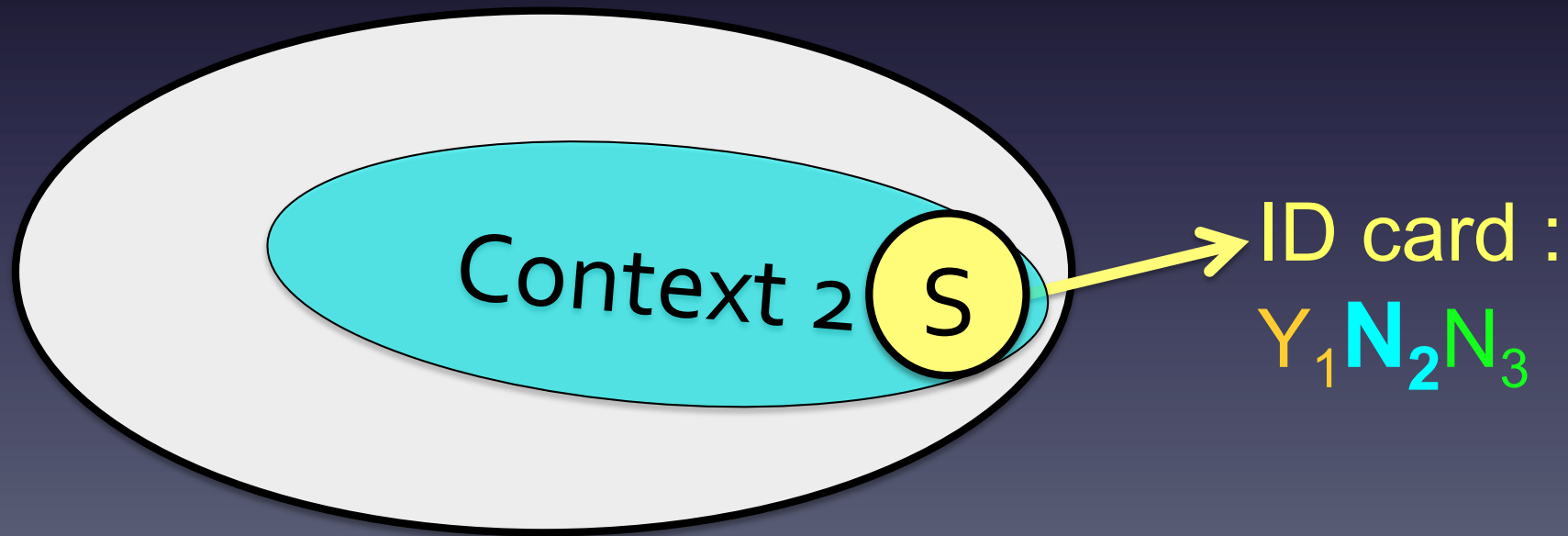


Généalogie d'un état classique

Observation du monde classique

(« Phénoménologie classique »):

J'obtiens **de façon répétée** les mêmes réponses
aux mêmes questions

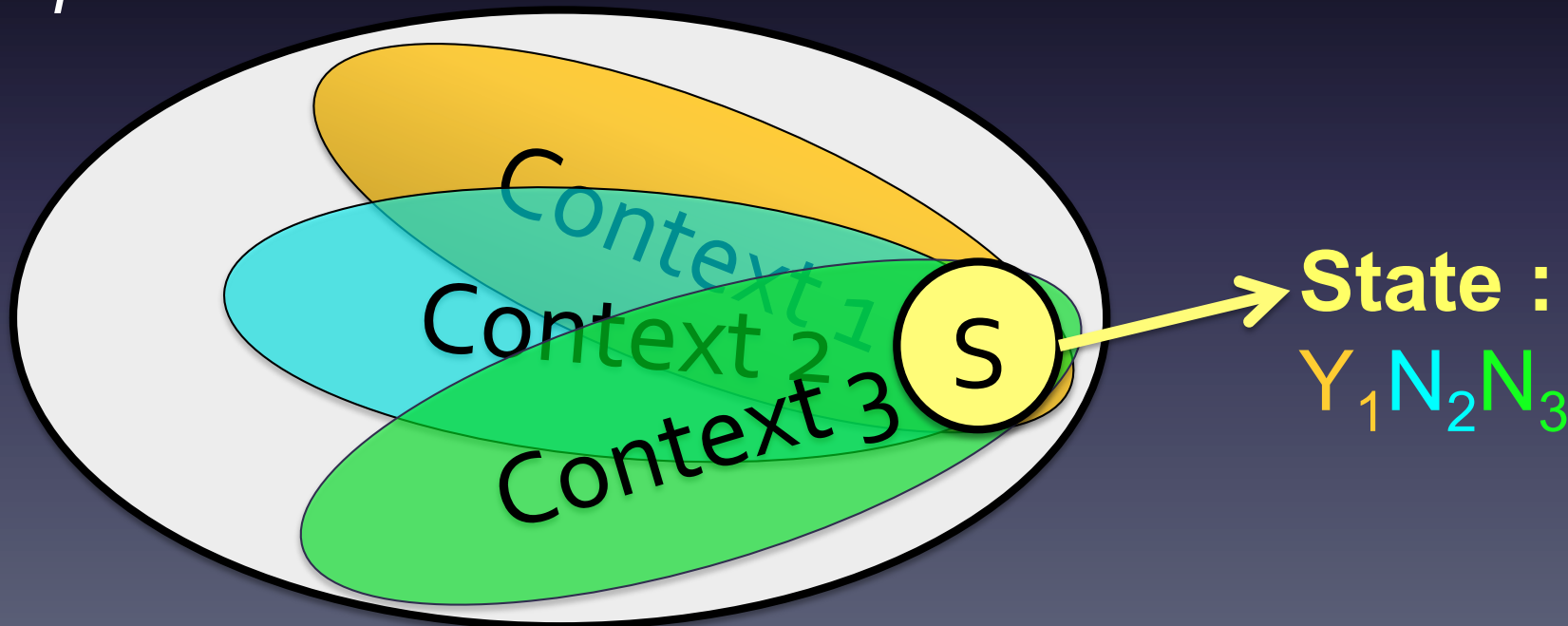


Généalogie d'un état classique

Répétabilité -> Certitude (*Psychologie*)

La carte d'identité (*Operationelle*) -> un état (*Ontologie*)

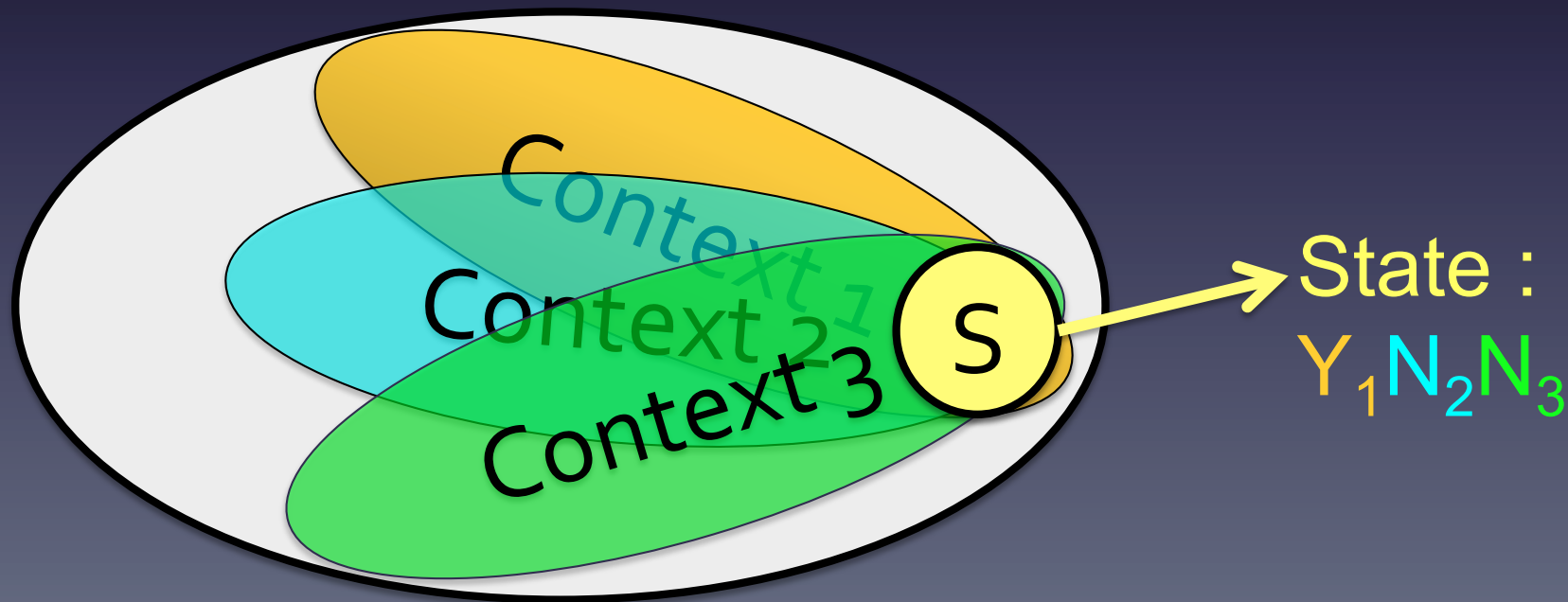
On explique les réponses répétables par une cause permanente : l'existence d'un état



Généalogie d'un état classique

Dans le monde classique, l'état ne dépend pas de l'ordre des questions:

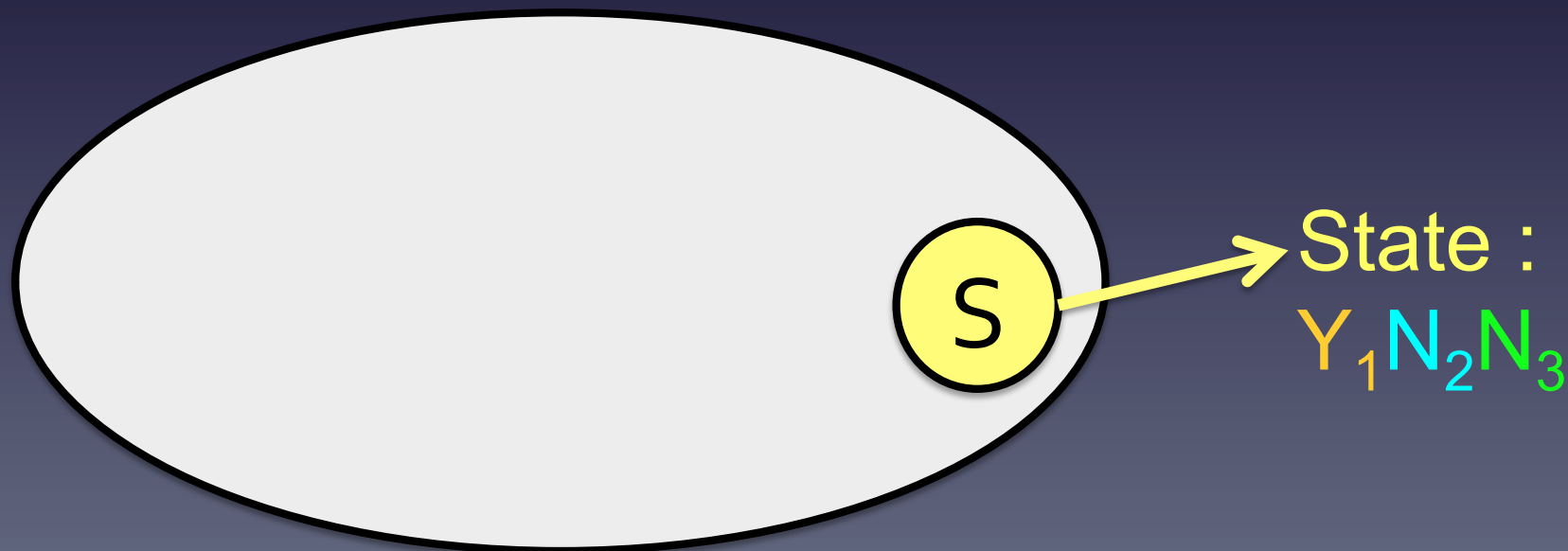
Je peux oublier les contextes, les questions, et attribuer l'état au système seul



Généalogie d'un état classique

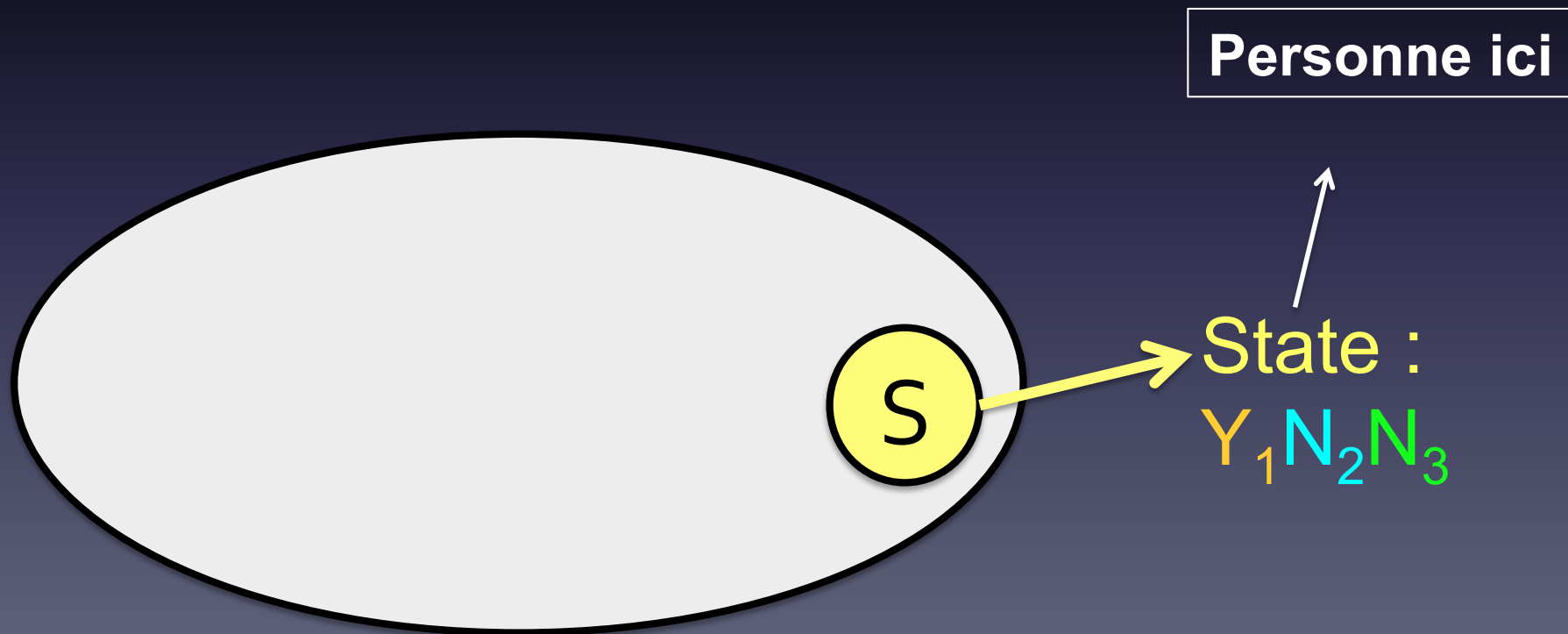
Dans le monde classique, l'état ne dépend pas de l'ordre des questions:

Je peux oublier les contextes, les questions, et attribuer l'état au système seul



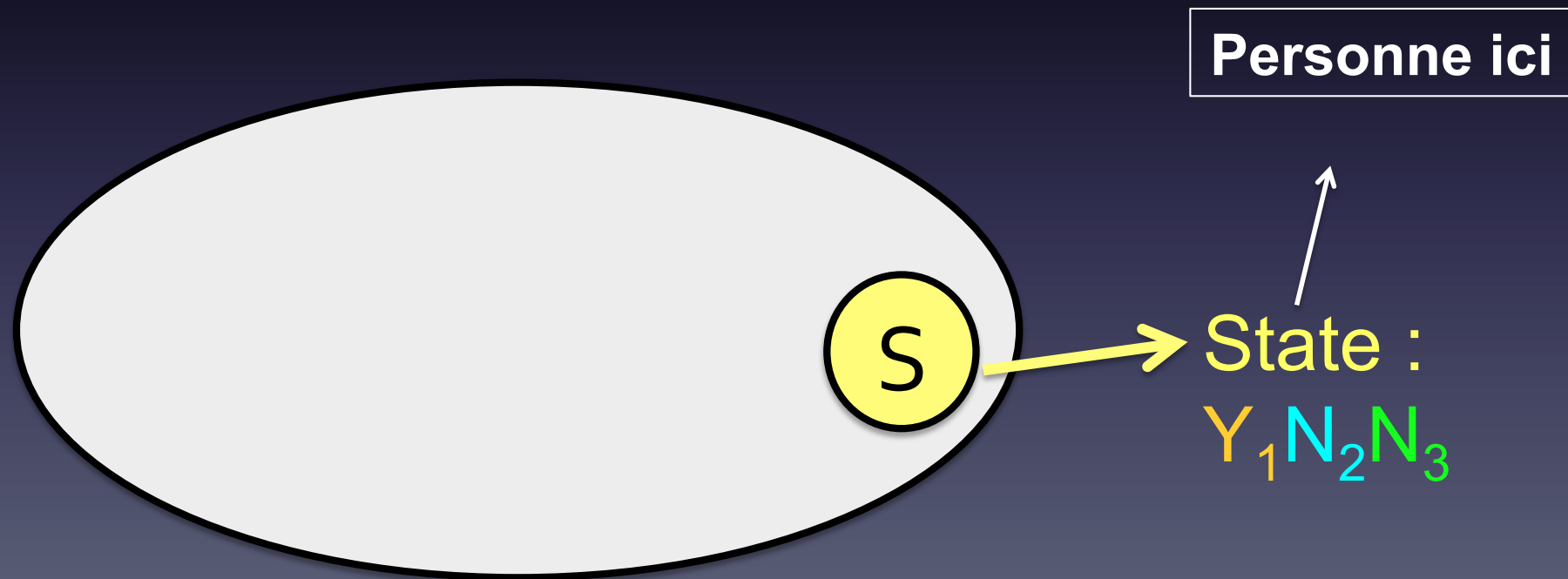
Généalogie de l'objectivité

C'est (croit on) **le cœur de l'objectivité** : l'état du système **existe de façon indépendante**, même si personne ne l'observe



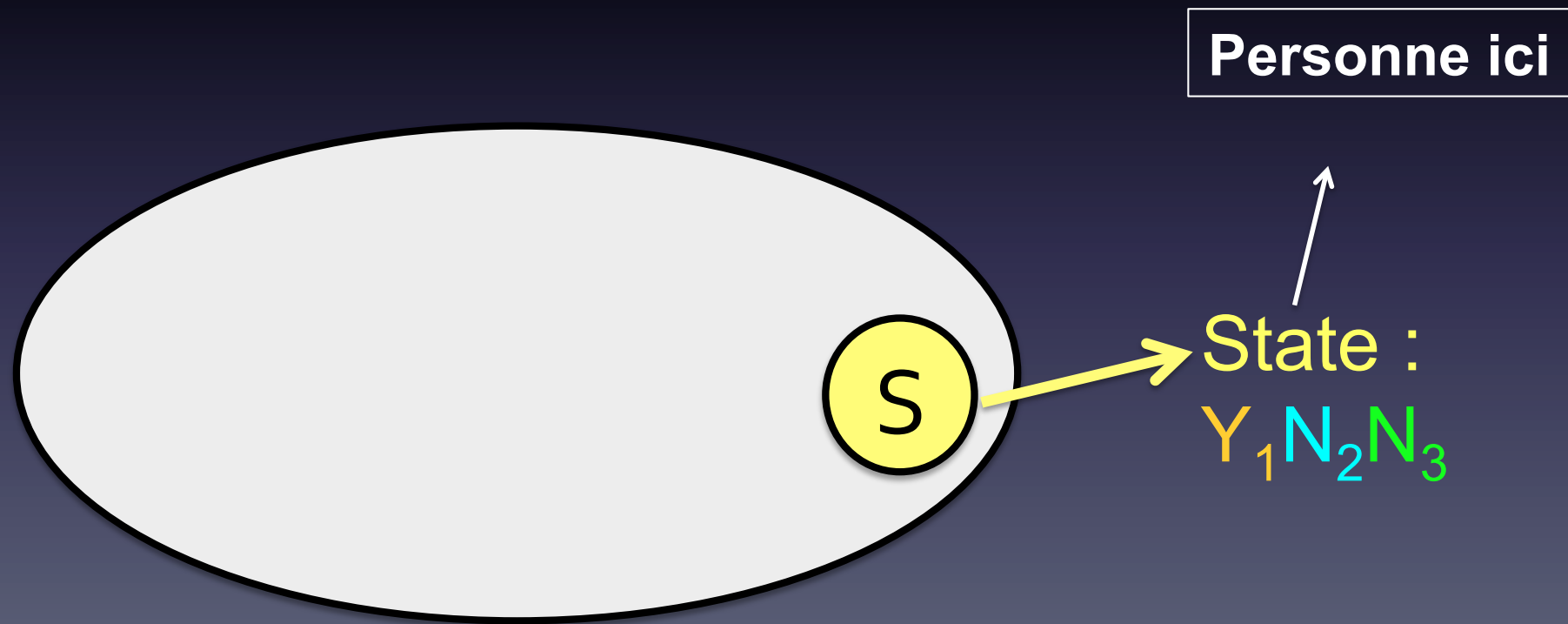
Généalogie de l'objectivité

Notre compréhension de l'objectivité =
l'existence d'états caractérisant un système seul
provient de la **phénoménologie classique** =
intuitions construites dans le monde classique



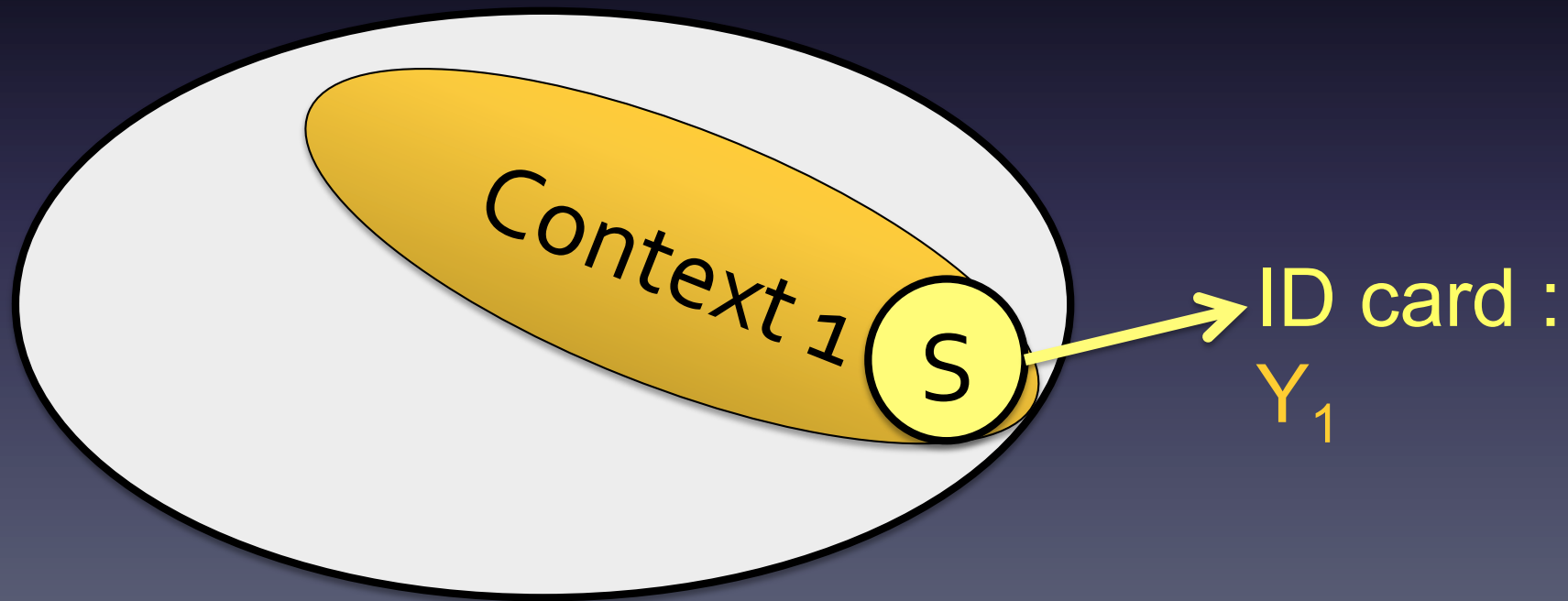
Généalogie de l'objectivité

Notre compréhension de l'objectivité et de la réalité sont des intuitions basées sur notre monde classique



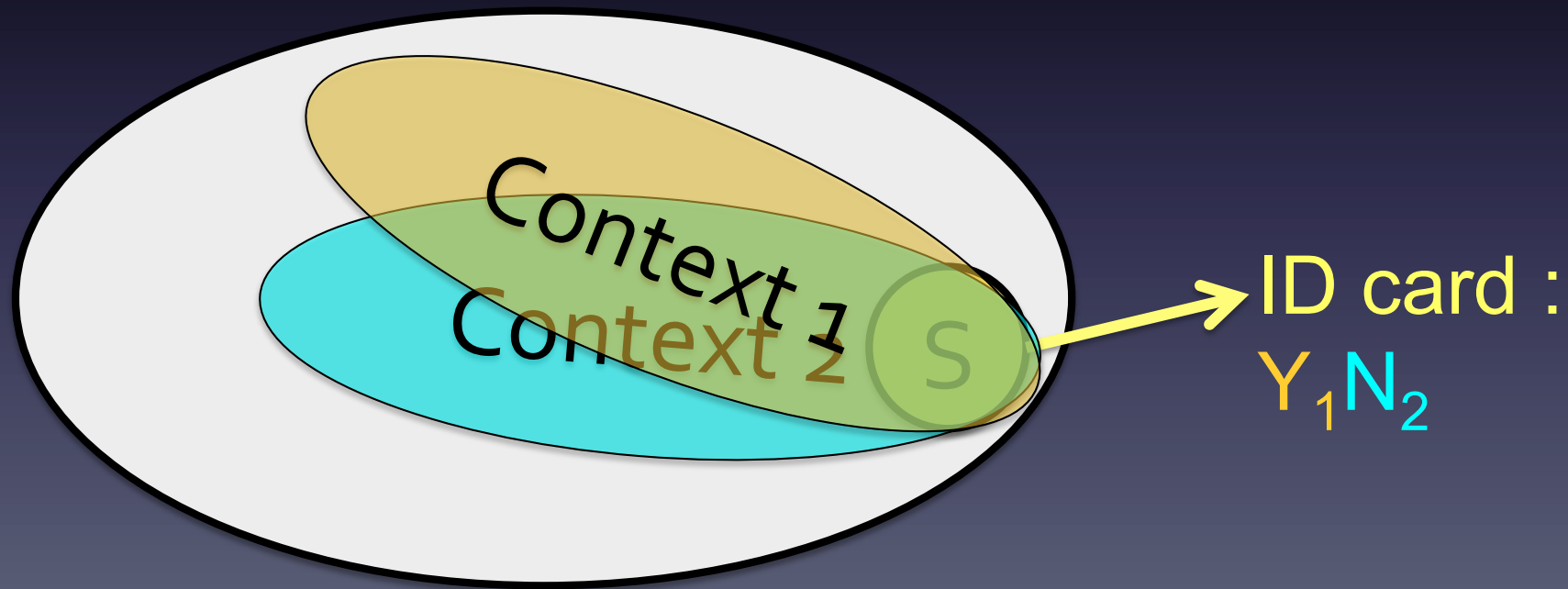
Phénoménologie quantique

La carte d'identité = les réponses peuvent dépendre de l'ordre des questions



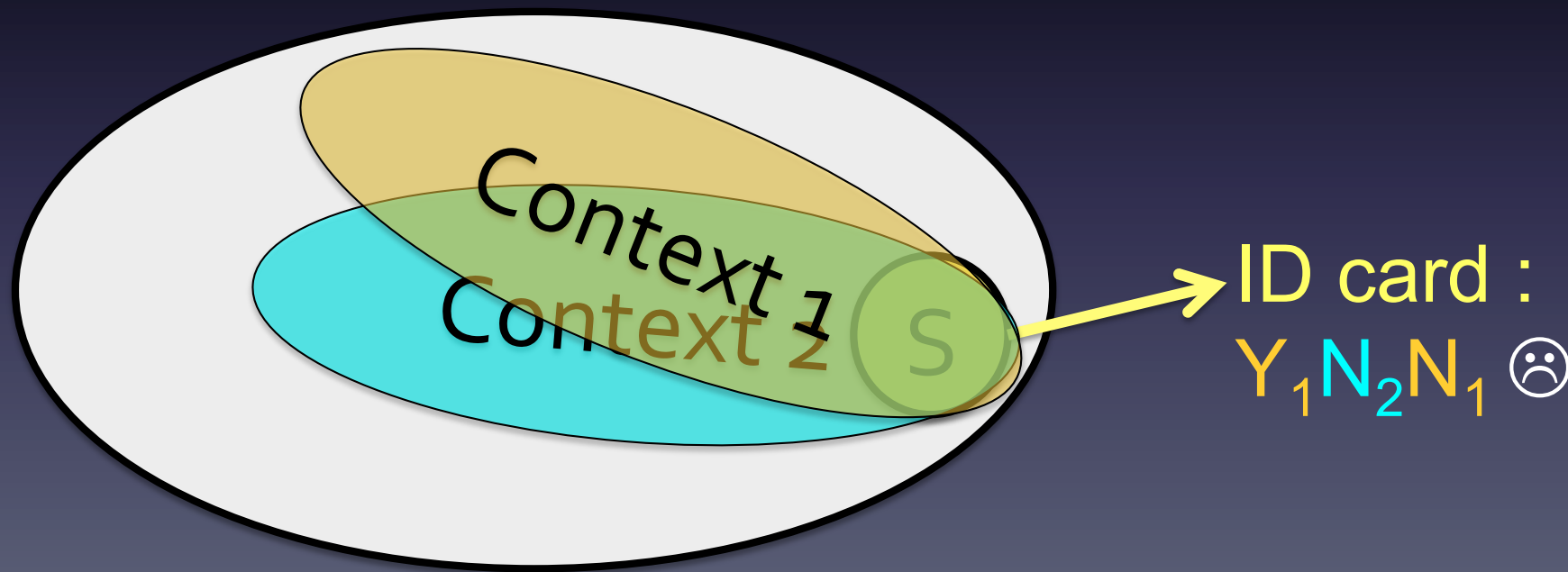
Phénoménologie quantique

La carte d'identité = les réponses peuvent dépendre de l'ordre des questions



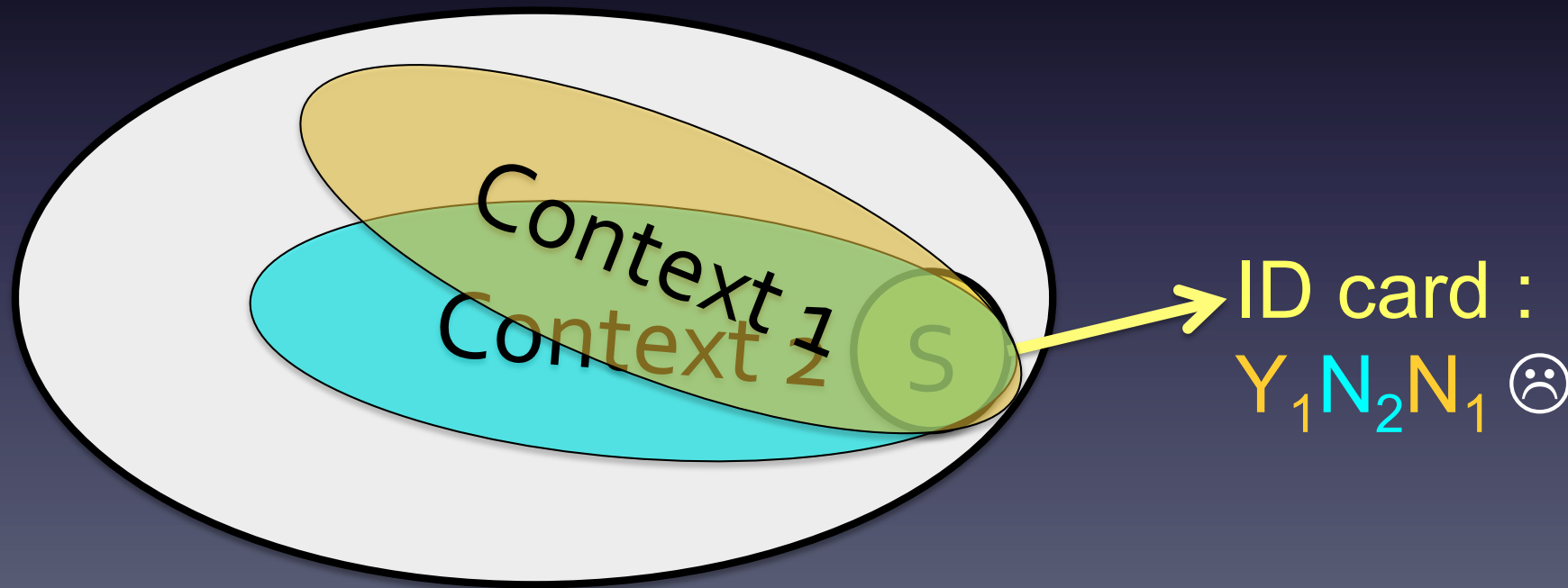
Phénoménologie quantique

La carte d'identité = les réponses peuvent dépendre de l'ordre des questions



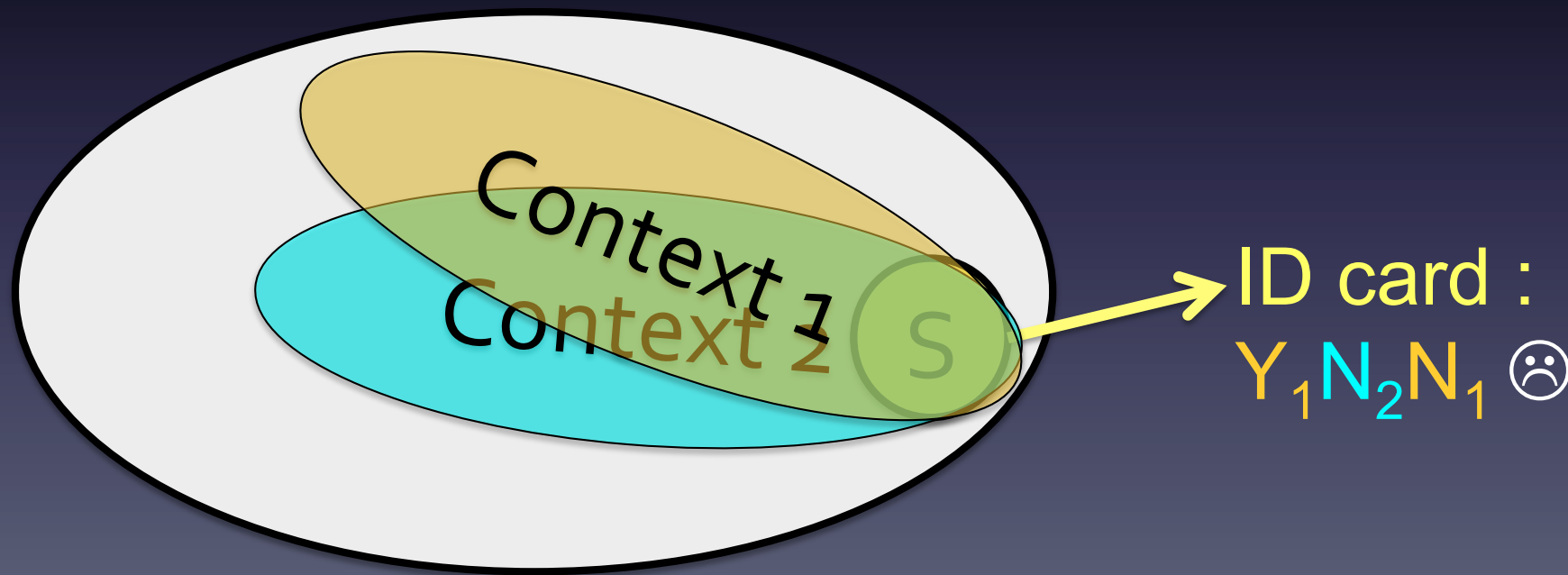
Option 1 : Réaliste ordinaire

L'état appartient au système seul, le contexte perturbe l'état



Option 2 : Anti-réaliste

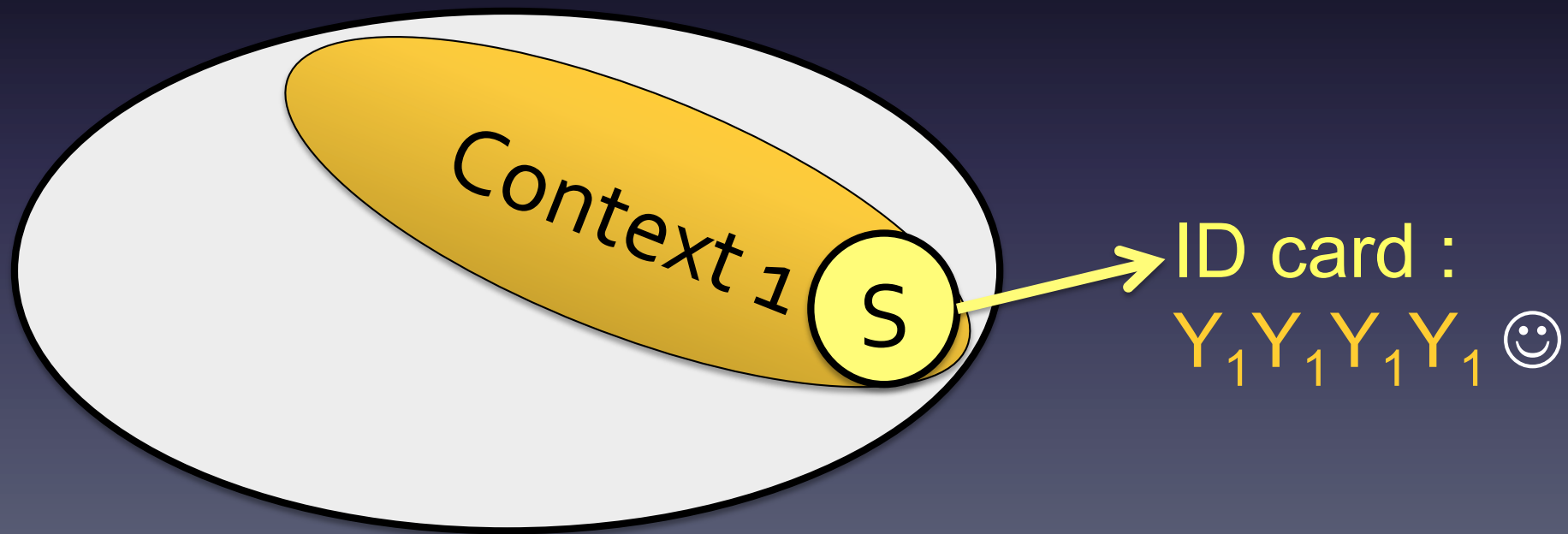
L'état n'existe pas, il n'y a que des préparations et des mesures



Option 3 : (Nouveau) réaliste

Observation : on peut obtenir la même réponse de façon répétée, dans le même contexte

On peut « upgrader » la carte d'identité en état, dans un contexte donné



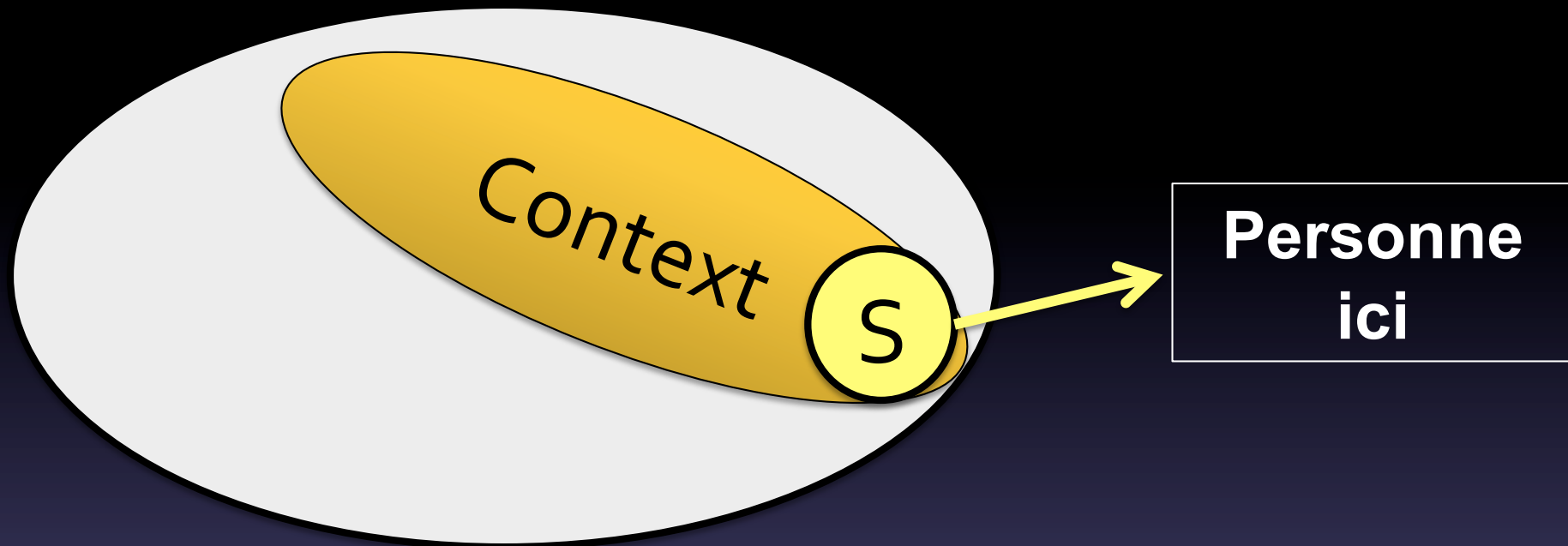
Postulat 1 : C-S-M

En physique quantique, l'état caractérise le **système** ET le **contexte**

Pour le différencier d'un état classique (qui ne dépend pas du contexte), nous appellerons l'état quantique une **modalité**

C-S-M ontologie «**Contexte-Système-Modalité**»

CSM et l'objectivité



Cette ontologie est parfaitement compatible avec l'objectivité. Le résultat de l'expérience sera le même, même si personne ne le regarde

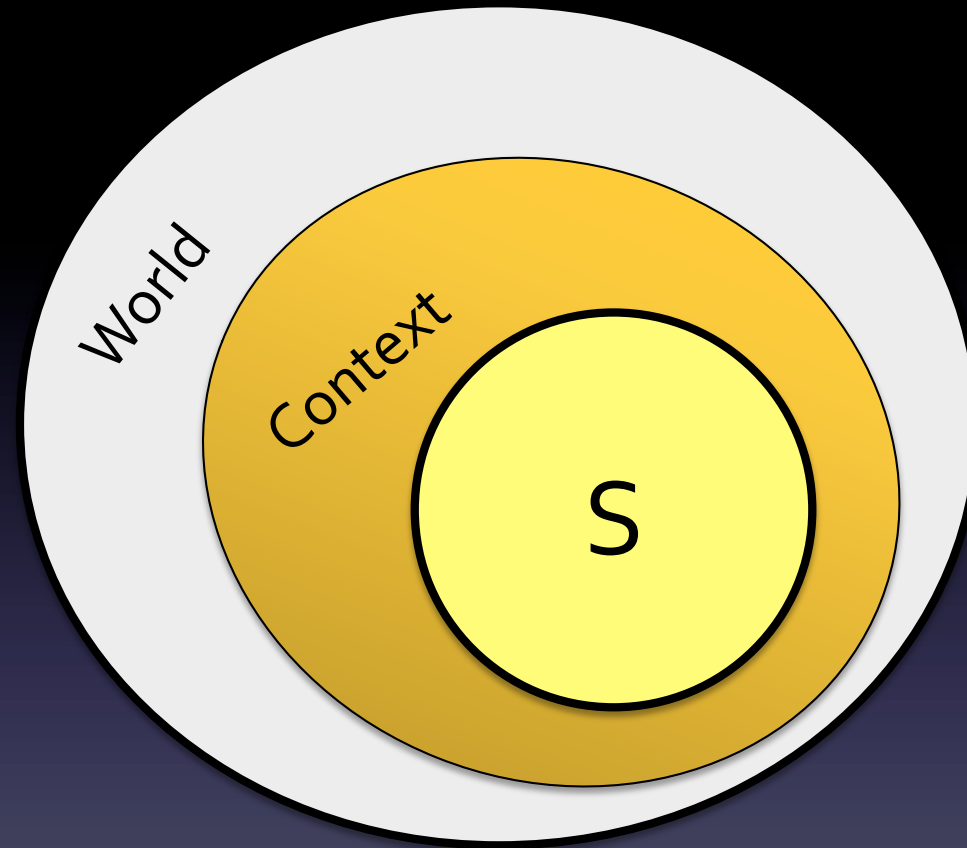
=> **C'est l'Objectivité Contextuelle**

L'exemple du photon polarisé

- **Systeme**: photon
- **Contexte** : le polariseur d'axes neutres $\{H,V\}$.
Détermine a question posée au système
- **Modalité** = le résultat d'une expérience = la réponse = « transmis »

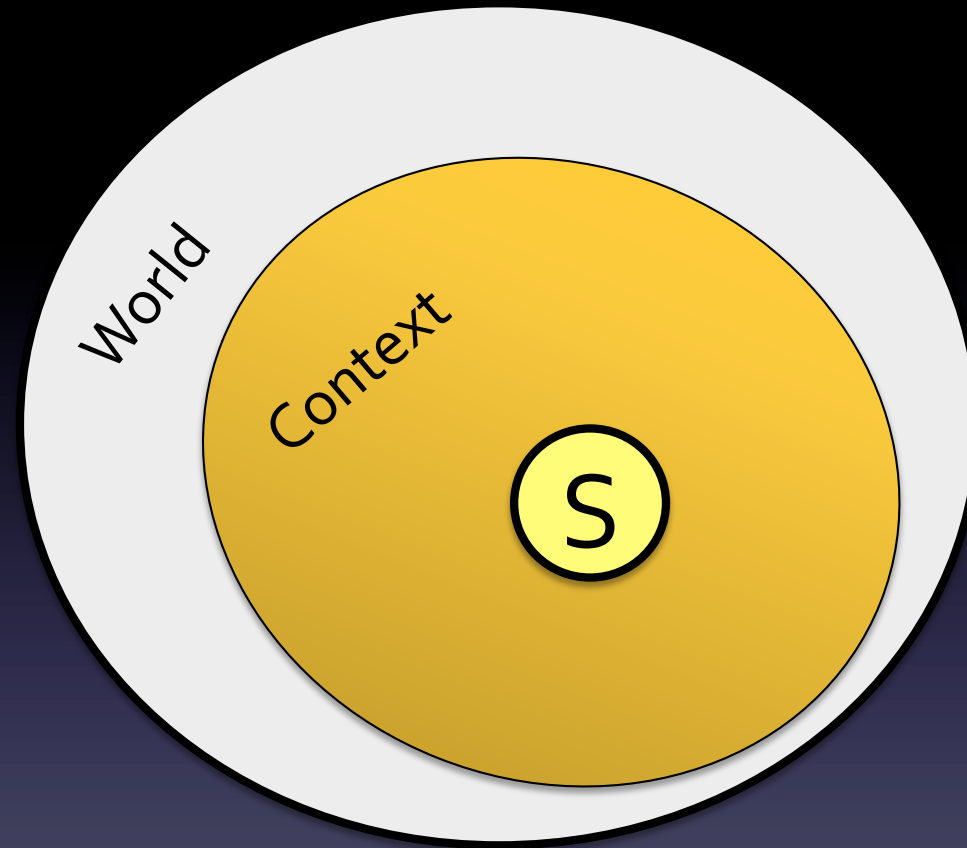
Pour CSM, un photon n'a pas de polarisation. Un photon et son polariseur ont une polarisation

De la miniaturisation en physique



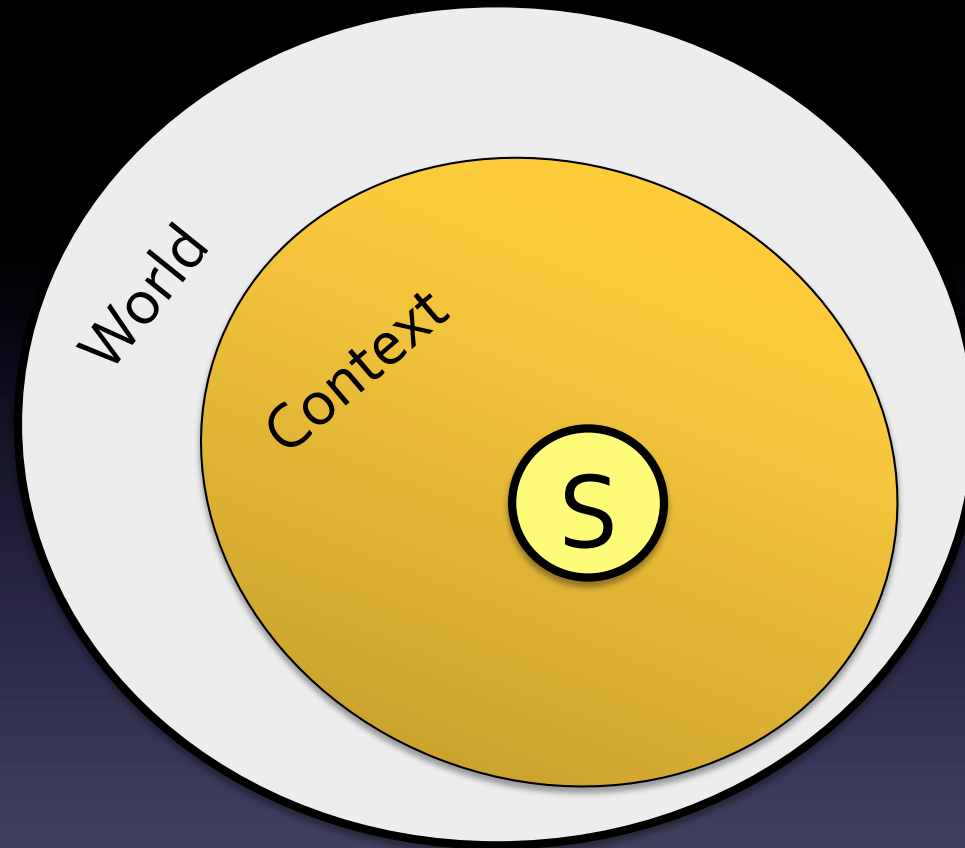
On commence par isoler un « grand »
système...

De la miniaturisation en physique



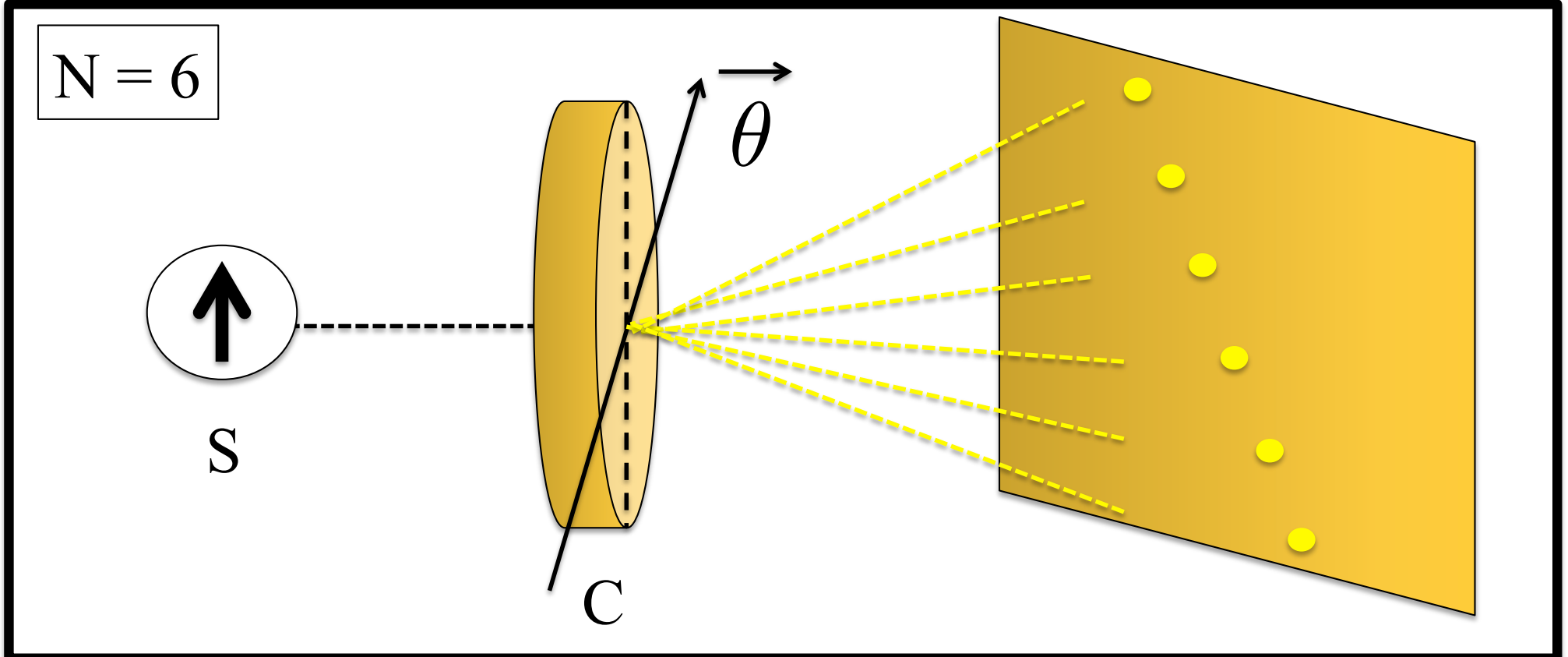
...et on réduit sa taille => systèmes
« quantiques »

Postulat 2 : Quantification



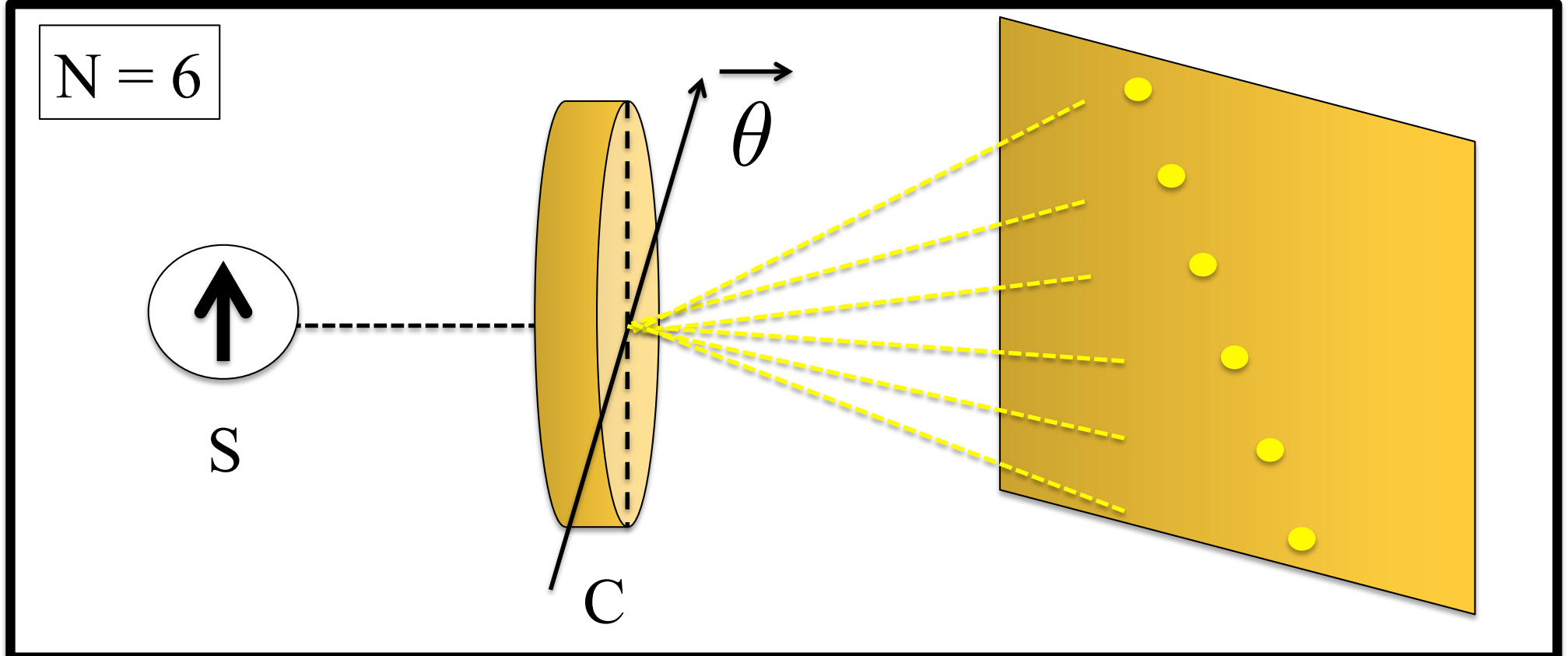
Pour les systèmes quantiques, quel que soit le contexte, il y a un nombre discret et fini de modalités exclusives

Postulate 2 : Quantification



Pour les systèmes quantiques, quel que soit le contexte, il y a un nombre discret et fini de modalités exclusives

Postulat 2 : Quantification



**Situation « textbook » de la physique
quantique**

Résumé des postulats

Phénoménologie => Non-commutation des questions => La carte d'identité = l'état dépend du contexte => **Postulat 1 : CSM**

Phénoménologie => Quel que soit le contexte, le système est caractérisé par un nombre fini N de modalités exclusives => **Postulat 2 : Quantification**

P1 et P2 sont deux postulats ontologiques, induits de la phénoménologie quantique

Pourquoi la MQ est aléatoire? L'exemple du photon polarisé

N=2 : deux modalités exclusives

Context 1 $\{H, V\}$	« Transmis » or « réfléchi »	$ H\rangle$ ou $ V\rangle$
Context 2 $\{H_\theta, V_\theta\}$	« Transmitted » or « reflected »	$ H_\theta\rangle$ ou $ V_\theta\rangle$

Pourquoi la MQ est aléatoire? L'exemple du photon polarisé

N=2 : deux modalités exclusives

Context 1 $\{H, V\}$	« Transmitted » or « reflected »	$ H\rangle$ ou $ V\rangle$
Context 2 $\{H_\theta, V_\theta\}$	« Transmis » or « réfléchi »	$ H_\theta\rangle$ ou $ V_\theta\rangle$

⇒ Quand le contexte change de C_1 vers C_2 , la réponse en C_2 ne peut pas être prédite avec certitude (sinon, il y aurait 4 modalités..)

Pourquoi la MQ est aléatoire? L'exemple du photon polarisé

N=2 : deux modalités exclusives

Context 1 $\{H, V\}$	« Transmitted » or « reflected »	$ H\rangle$ ou $ V\rangle$
Context 2 $\{H_\theta, V_\theta\}$	« Transmis » or « réfléchi »	$ H_\theta\rangle$ ou $ V_\theta\rangle$

⇒ **Aléatoire irréductible** lors du
changement de contexte

L'aléatoire quantique

Avec CSM :

- ⇒ L'aléatoire n'est pas dû à une barrière pratique comme le microscope de Heisenberg
- ⇒ Ni à une perturbation induite par la mesure projective
- ⇒ **L'aléatoire se manifeste car il y a moins de réponses certaines que de questions possibles**
- ⇒ CSM donne un fondement ontologique à l'aléatoire en MQ

Pour en savoir plus...

Contexts, Systems and Modalities: a new ontology for quantum mechanics

Alexia Auffèves⁽¹⁾ and Philippe Grangier⁽²⁾

(1): Institut Néel, BP 166, 25 rue des Martyrs, F38042 Grenoble Cedex 9, France

(2): Institut d'Optique, 2 avenue Augustin Fresnel, F91127 Palaiseau, France

arXiv:1409.2120, Accepted in Foundations of Physics

A simple derivation of Born's rule with and without Gleason's theorem.

Alexia Auffèves⁽¹⁾ and Philippe Grangier⁽²⁾¹

¹ *(1): Institut Néel, BP 166, 25 rue des Martyrs, F38042 Grenoble Cedex 9, France.*

*(2): Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique, CNRS, Univ. Paris Sud,
2 avenue Augustin Fresnel, F91127 Palaiseau, France.*

arXiv:1505.1369 (2015)