

Mécanique Quantique

$$\hat{H}\Psi = j\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

- L3 Physique Fondamentale, ENS Paris-Saclay, Double Licence Maths-Physique,
- L3 D2PF (Double Diplôme Physique Fondamentale)

D2PF Mécanique Quantique

Enseignant : Hervé Bergeron (ISMO, Paris Saclay)

email: herve.bergeron@u-psud.fr

ou

herve.bergeron@universite-paris-saclay.fr

- MQ I = S5 \Rightarrow 24 h

(1 cours-TD = 2h)

- MQ II = S6 \Rightarrow 20 h

(1 cours-TD = 2h)

Modalités de contrôle des connaissances (D2PF)

Partiels et examens en commun avec tous les étudiants
(pour toutes les matières suivies)

Note S5= $\sup \{ \text{moyenne (P,E)}, E \}$

Note S6= $\sup \{ \text{moyenne (P,E)}, E \}$

P = partiel , E = examen

Contenu du cours



Difficultés Pédagogiques en Mécanique Quantique (MQ)

Deux Méthodes de cours d'introduction à la MQ possibles

- Approche « chronologique/historique »: on apprivoise peu à peu la MQ en reprenant le chemin des pionniers avec leurs questionnements à propos de **faits fondamentaux inexpliqués** à leur époque et leurs premières tentatives théoriques....
- Approche « à la Feynman »: on part directement de la « formulation moderne » de la MQ en se frottant directement à toutes ses étrangetés, illustrées par des résultats expérimentaux « modernes » attestés.

Ce cours: mélange des deux.

MQ Partie I

Historique, lumière/photon, DeBroglie

Maths: espaces de Hilbert, notations de Dirac

Les postulats de la MQ.

Mécanique Ondulatoire, Equation de Schrodinger

Mécanique Ondulatoire, puits de potentiel

Systèmes à deux niveaux

Commutation des observables, symétries

Intrication Quantique, produit tensoriel d'états

L'oscillateur harmonique 1D puis 3D

Moments cinétiques, spins

Atome d'Hydrogène

MQ Partie II

(Programme non-définitif)

Perturbations dépendantes du temps

Polarisation du photon

Retour sur l'intrication

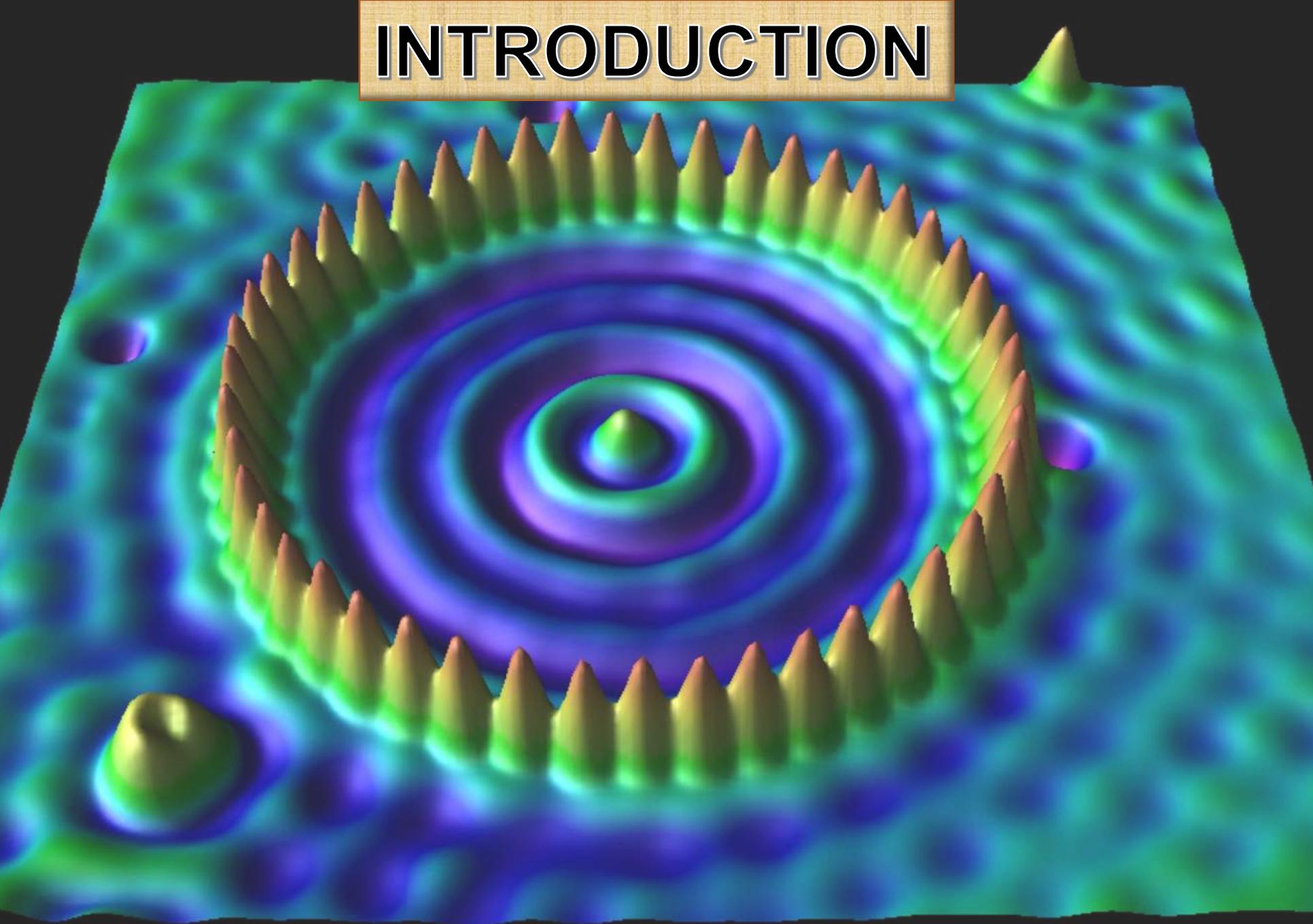
Résonance magnétique

Addition des moments cinétiques

Perturbations indépendantes du temps

Particules identiques et permutations

INTRODUCTION



Vidéo Intro-Cours Feynman



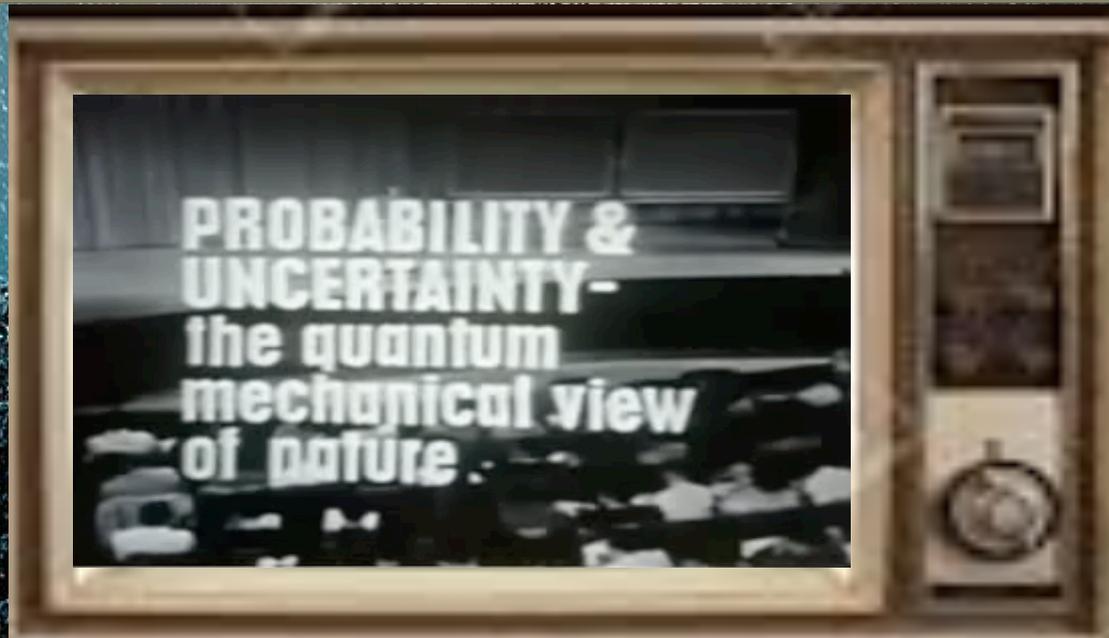
Richard Phillips Feynman (1918-1988) est un [physicien américain](#), l'un des plus influents de la seconde moitié du [xx^e siècle](#), en raison notamment de ses travaux sur l'[électrodynamique quantique](#), les [quarks](#) et l'[hélium superfluide](#). Il reformula entièrement la [mécanique quantique](#) à l'aide de son [intégrale de chemin](#), qui généralise le [principe de moindre action](#) de la [mécanique classique](#) et inventa les [diagrammes qui portent son nom](#) et qui sont désormais largement utilisés en [théorie quantique des champs](#) (dont l'électrodynamique quantique fait partie).

Prix Nobel de Physique 1965 avec S.I. Tomonaga et J. Schwinger pour leurs travaux en électrodynamique quantique.

[Pédagogue](#) remarquable et drôle, il est le rédacteur de nombreux ouvrages de [vulgarisation](#) reconnus. Parmi ces livres, les [Feynman lectures on physics](#), un cours de physique de niveau universitaire qui, depuis sa parution, est devenu un classique pour tous les étudiants de premier cycle en physique et leurs professeurs.

(Source Wikipedia)

Richard Feynman: Lectures at Cornell University ~1950



Question: « Prof. Feynman, to what extent is it really possible to understand Quantum Mechanics? »

- Le terme « **Mécanique Quantique** » (MQ) est un « reliquat historique », on devrait plutôt parler aujourd'hui de « **Physique Quantique** ».
- A l'échelle microscopique, seule la « Physique Quantique » est en principe pertinente.
- La MQ est quantitativement prédictive, mais uniquement **probabiliste**.
- Excellent accord théorie-expérience: la MQ n'a jamais été mise en défaut (malgré un nombre d'expériences fondamentales de plus en plus précises)

$$\vec{\mu}_B = g \times \frac{e}{2m} \vec{S}$$

Facteur gyromagnétique

$$(g - 2)_{\text{exp}} = 0.001\,159\,652\,153\,5\,(24)$$

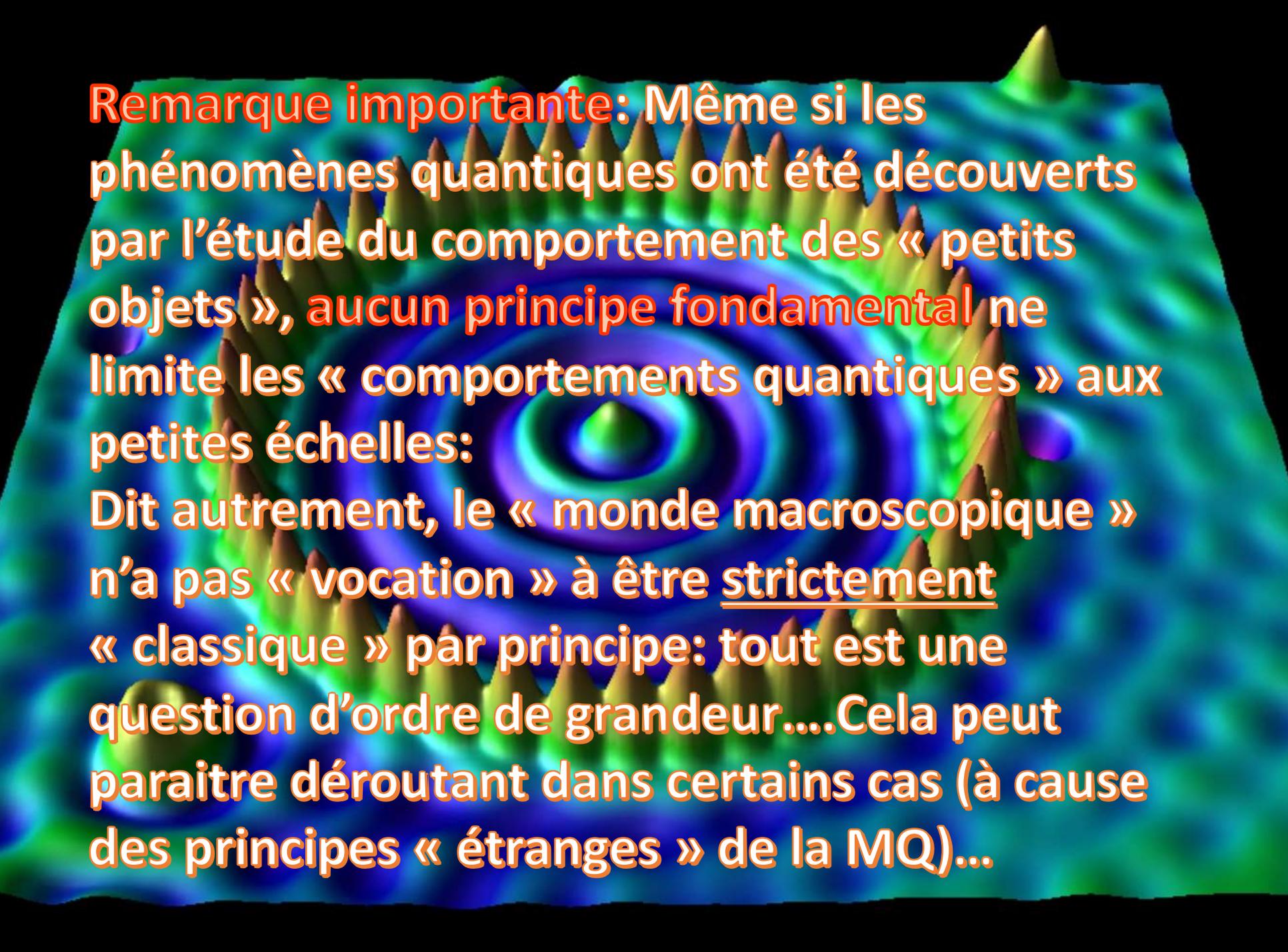
$$(g - 2)_{\text{théorie}} = 0.001\,159\,652\,188\,4\,(43)$$

Théorie quantique des champs

La MQ : une révolution technologique

- Une grande part du PIB des pays développés découle directement ou indirectement des technologies quantiques !
 - semi-conducteurs
 - Lasers
 - Nucléaire
 - IRM
 - Horloges atomiques, GPS
 -
- Une autre révolution est en train de voir le jour : cryptographie quantique et ...
... ordinateur quantique !





Remarque importante: Même si les phénomènes quantiques ont été découverts par l'étude du comportement des « petits objets », aucun principe fondamental ne limite les « comportements quantiques » aux petites échelles:

Dit autrement, le « monde macroscopique » n'a pas « vocation » à être strictement « classique » par principe: tout est une question d'ordre de grandeur.... Cela peut paraître déroutant dans certains cas (à cause des principes « étranges » de la MQ)...

La MQ : une révolution conceptuelle

- « **Dualité onde-corpuscule** »: dans certaines conditions un système quantique « semble se comporter » comme une « onde », dans d'autres conditions comme un « corpuscule ».
(ex : le photon versus les ondes électromagnétiques)
- **Systèmes quantiques « intrinsèquement » aléatoires** »: le hasard quantique **n'est pas « compatible avec/explicable par »** une connaissance imparfaite du système, comme dans le cas des systèmes aléatoires classiques.
- => **Remise en question de notre conception du « réel » et des concepts fondamentaux de la physique classique** :
déterminisme, trajectoires des objets, valeur « objective » des grandeurs ...

La remise en cause profonde/fondamentale qu'imposent « les faits expérimentaux quantiques » est celle de notre conception de « **l'objectivité** » des grandeurs physiques (diapos suivantes) => nécessité d'une conceptualisation et d'une formalisation complètement différente de la Physique « fondamentale ».

La Conception Classique en quelques règles

- Les « objets » ont des propriétés qui leur sont « propres » et qui sont toutes accessibles à l'observation/mesure.
- Les observations de différentes propriétés sont toujours (théoriquement) cumulables en même temps.
- => Par des expériences « astucieuses » nous pouvons toujours avoir accès à ces propriétés sans aucune restriction et sans « perturber significativement » le comportement des objets => l'observateur idéal est un pur spectateur « qui sait tout ».
=> Un manque d'information est toujours dû à l'observateur imparfait.
- Les relations entre les propriétés (ainsi que leurs évolutions) vérifient des « lois » (le monde possède des « régularités »).
- Le « job » du physicien classique est de découvrir les propriétés « vraies » des objets ainsi que les « lois exactes » qui les relient, lois représentées par des modèles mathématiques => Idéalement un objet matériel peut être exactement remplacé par des « grandeurs mathématiques » évoluant au cours du temps.

La MQ : Question « d'objectivité/onticité »

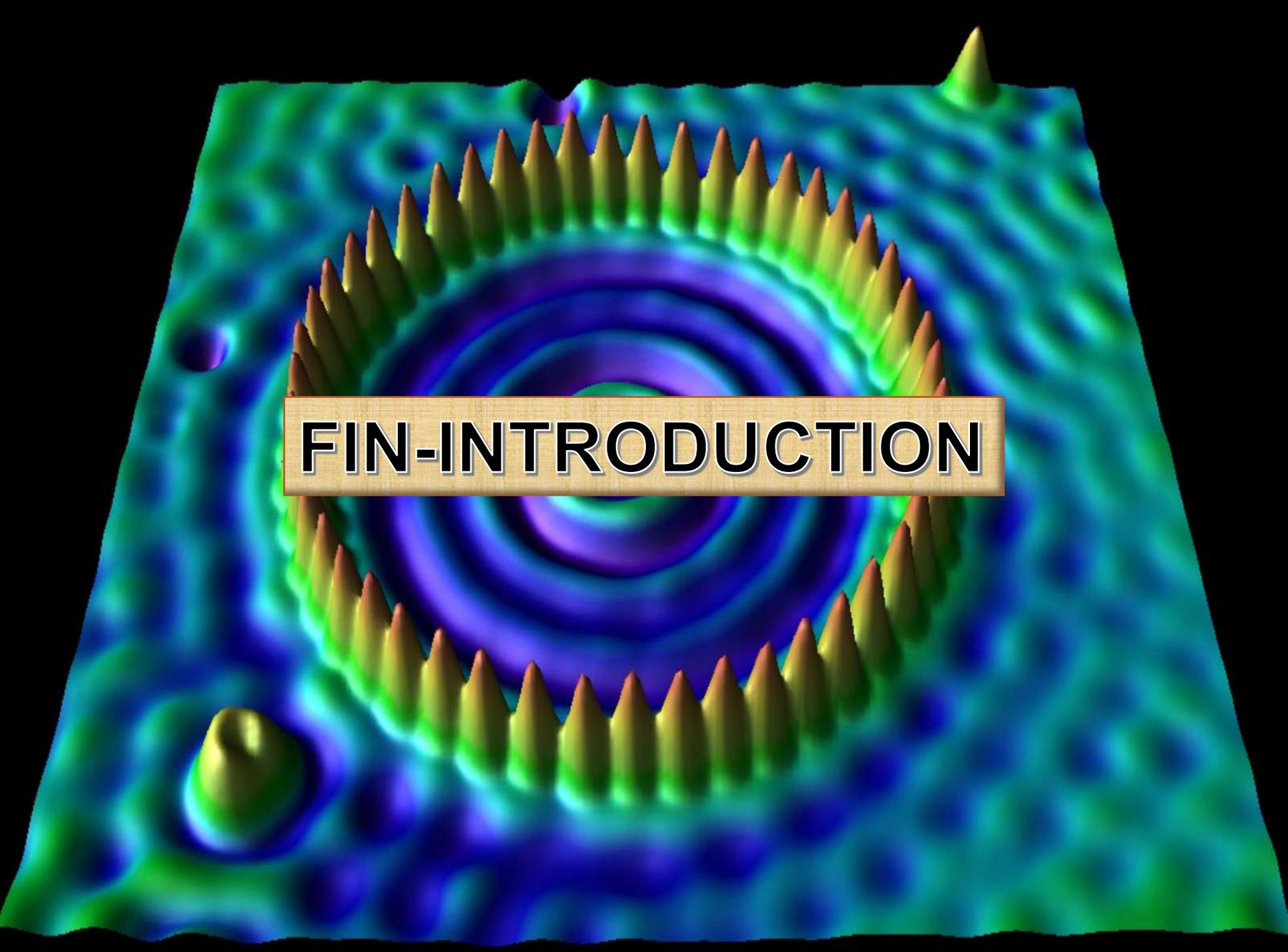
Nature objective/ontique d'une grandeur physique: hypothèse (classique) selon laquelle une « grandeur physique » est une « vraie » propriété de l'objet étudié (pas une simple représentation due à notre esprit). Dit autrement cette propriété est supposée « exister en soi » et « appartenir en propre » au système.

Mesurabilité d'une grandeur: on admet de plus qu'une propriété objective est toujours « représentable par/réductible à » des nombres accessibles à la mesure.

Conséquence (cf diapo d'avant): Une mesure au sens « classique » n'est en fait qu'une « collecte d'information » préexistante. L'observateur « classique » est un pur spectateur.

Conception d'un « objet » en Physique Classique (cf diapo d'avant): un objet se résume à la liste de toutes ses propriétés physiques qui sont supposées objectivement lui « appartenir » et « toutes exister » en même temps. Un expérimentateur « idéal » particulièrement astucieux est alors théoriquement capable d'avoir accès à « toute l'information physique », c'est-à-dire aux valeurs de toutes les grandeurs.

Remise en cause due aux « faits expérimentaux quantiques »: Les réflexions des physiciens les ont conduits à la conclusion que ces faits n'étaient pas compatibles avec « le cadre conceptuel général classique » (indépendamment de toute équation). La seule solution trouvée a été de remettre en question à la fois la « nature objective/ontique » des grandeurs, le « rôle passif » de l'observateur et **d'abandonner l'idée de pouvoir prédire l'évolution déterministe d'un système « quantique » individuel.**

A 3D topographical map showing a circular structure with a central peak and concentric rings. The structure is surrounded by a ring of smaller peaks. The color scale ranges from blue (low) to red (high).

FIN-INTRODUCTION