

Physique quantique au lycée

Une expérience au Liceo di Locarno

Christian Ferrari

Cours de formation CRP/CPS

Champéry, 23 septembre 2011

Plan de l'exposé

1

- ① L'expérience dans l'option spécifique (OS) et l'option complémentaire (OC)
- ② L'expérience dans les travaux de maturité (TM)
- ③ Les réflexions d'un groupe de travail cantonal (GC)

BUT: présenter des expériences concrètes, réalisées en 9 ans avec
3 classes d'OS, 4 classes d'OC et 10 TM

OS+OC: Pourquoi la physique quantique?

2

- Permet de **faire le point sur les “fondements” de la physique classique**
- Est très important du point de vue d'une **culture scientifique** (révolution scientifique)
- **Développements expérimentaux** des derniers 40 ans très importants
- Même les fondements de la physique quantique “entrent dans le quotidien”
- Permet de **motiver** les élèves vers la physique

OS+OC: L'approche proposée

3

- Approche “non standard”
- Seulement une **courte introduction à l’“ancienne théorie quantique”** (1900-1925)
- Approche basée sur les **évidences expérimentales** des “systèmes à deux niveaux”
- En fonction de la classe, **formalisation pour les “systèmes à deux niveaux”**
- Accent sur quelques **aspects épistémologiques ou récents**
- Possibilité de montrer des **expériences en classe** [Projet SATW-SPS 2010]

OS+OC: Les maths: quel rôle?

4

- **OC**: quelques **notions de base sur \mathbb{C}**
- **OS**: par le collègue de maths bonnes bases d'**algèbre linéaire sur \mathbb{C}** (espace vectoriel, produit scalaire et norme, projecteurs, matrices, valeurs propres et vecteurs propres) donc **approche algébrique plus poussée**
- **OS**: but **interaction maths - physique**, la physique quantique offre une possibilité intéressante (pas que de l'analyse!)

OS+OC: Quel espace pour la physique quantique?

5

ANNÉE	HEURES	OS
II	3	Thermodyn. + Mécanique + Electrostatique
III	3+3	Ondes + Relativité + Cinématique
IV	3+3	Electrodynamique + Dynamique + FQ

ANNÉE	HEURES	OC
II	3	Thermodyn. + Mécanique + Electrostatique
III	2	Ondes + Electrodynamique
IV	2	FQ + Monde subatomique

OS: Quelques détails du programme (1)

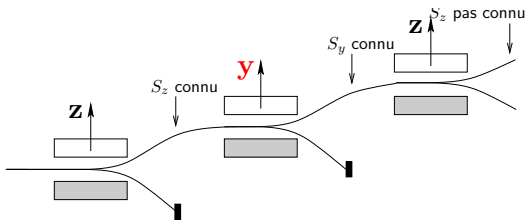
6

- 1 Quelques “**fondements**” de la physique classique (déterminisme, compatibilité et réalité, séparabilité, action locale)
- 2 Présentation de **la crise du début XX: faits expérimentaux et solutions de l’“ancienne théorie quantique”**
 - domaine de la **radiation**: corps noir, effet photoélectrique et photon, effet Compton
 - domaine des **basses température**: chaleur spécifique
 - domaine des **atomes**: modèle atomique de Bohr, expérience de Stern-Gerlach et spin
- 3 Formalisation de la physique classique: **états, observables, évolution temporelle.**

OS: Quelques détails du programme (2)

7

- ④ Le **spin** $\frac{1}{2}$ et l'appareil de Stern-Gerlach (SG):
- mise en évidence d'**observables non compatibles** \implies introduction des **matrices** comme **observables**
 - introduction des **états** (pur) comme **vecteurs** (ou **projecteurs**)
 - la **mesure**: **probabilités objectives**, réduction de l'état
 - discussion de quelques expériences simples (SG en série)
 - **évolution temporelle** comme **matrices unitaires**: spin en champ magnétique



OS: Quelques détails du programme (3)

8

- 5 Les **interférences quantiques** à une particule:
 - introduction générale aux interférences quantiques (exp. de Zeilinger avec neutrons, C_{60} , “which-way”)
 - discussion et critique (selon Lévy-Leblond) du dualisme onde-particule
 - description de l'**interféromètre de Mach-Zehnder**
 - introduction des états comme vecteurs associés à la propagation, de l'évolution comme matrices unitaires
 - discussion de quelques expériences
 - conclusion sur la nature délocalisée des particules quantiques, le rôle des **états de superposition** et le rôle du **principe d'indiscernabilité**
 - l'expérience de Rauch
- 6 L'**interféromètre de Franson**, les **états intriqués** et les **corrélations quantiques**
- 7 Le **théorème de Bell** et la nature non locale des corrélations
- 8 **Réflexions sur la vision quantique du monde**

OC: Quelques détails du programme

9

- ① Quelques “fondements” de la physique classique
- ② Présentation de la **crise du début XX: fait expérimentaux et solutions de l’“ancienne théorie quantique”**
- ③ Les **interférences quantiques à une particule**:
 - introduction générale aux interférences quantiques
 - discussion et critique du dualisme onde-particule
 - description de l’**interféromètre de Mach-Zehnder**
 - introduction des états comme *kets* associés à la propagation, de l’évolution et des probabilités comme “règles de calculs”
 - discussion de quelques expériences
 - conclusion sur la nature délocalisée des particules quantiques et le rôle du **principe d’indiscernabilité**
- ④ L’**interféromètre de Franson** et les **corrélations quantiques**
- ⑤ Le **théorème de Bell** et la nature non locale des corrélations
- ⑥ **Réflexions sur la vision quantique du monde**

OS+OC: Une petite évaluation

10

Evaluation des objectifs: dans l'**OS** par des exercices ciblé, sur l'ensemble on a obtenu comme taux de réussite:

moyenne 66%

dev. st. 19%

mediane 70%

Evaluation des impressions des élèves: dans l'**OS** au moyen d'un formulaire, quelques conclusions:

- la physique quantique stimule les élèves qui pensent qu'il est important de s'en occuper (sur le plan culturel, scientifique et philosophique) [81%]
- niveau réputé accessible par la plupart des élèves [69%]
- tous trouvent l'enseignement de la physique quantique positif et en encouragent l'enseignement.

En général la physique quantique intéresse les élèves de l'**OC**, c'est un des sujets le plus apprécié

TM: Quelle philosophie?

11

- Thème en fonction des **potentialités de l'élève** (en général déjà connu car en OS)
- Généralement des **sujets challenging**
- Occasion pour le prof de faire une “**formation continue**”
- Permet d'**expérimenter des pistes** avant de les proposer dans les cours de OS ou OC

TM: Quelques exemples

12

Voici une liste des sujets traités:

- L'expérience de Rauch
- Le théorème de Bell
- La téléportation quantique [Prix 150 ans ETHZ – 2005]
- L'argument EPR
- L'argument GHZ
- La cryptographie quantique
- Quantum computer
- La gomme quantique
- Les franges de Ramsey

Tous ces sujets ont été précédés par une introduction générale et l'étude de modèles simples tel le **spin**, la **polarisation du photon** ou l'**interféromètre de Mach-Zehnder**.

Le groupe de travail (institué par le département pour le cours de l'OS) a le but de:

- revoir le plan d'étude en fonction aussi des nouvelles expérimentations
- **introduire dans le plan d'études des nouveaux sujets**
- renforcer l'interaction physique - mathématiques
- organiser des cours de formation continue

Après réflexion, le groupe a proposé l'introduction à tous les effets de la physique quantique. Voici le programme (partie physique):

- **La crise de la physique quantique et les premiers modèles**
(corps noir, effet photoélectrique et photons, l'atome de Bohr, l'expérience de Stern-Gerlach et la découverte du spin)
- **La physique quantique des systèmes à deux niveaux**
(spin, polarisation du photon, interféromètre de Mach-Zehnder)
- **Considérations épistémologiques**

Quelques références

15

- M. Le Bellac, *Physique quantique*, CNRS Editions (2003)
- M. Le Bellac, *Une introduction au monde quantique*, EDP (2010)
- M. Le Bellac, *Introduction à l'information quantique*, Belin (2005)
- M. Esfeld, *Philosophie des sciences*, PPUR (2006)
- C. Ferrari, B. Braunecker, *Entanglement, which-way measurements, and a quantum erasure*, Am. J. Phys. **78** (2010)
- C. Ferrari, *Fisica quantistica nel corso FAM : una sperimentazione*
- C. Ferrari, *Modern Physics at the Liceo di Locarno*, Communications de la Société Suisse de Physique **27** (2009)
- J.-M. Lévy-Leblond, *De la matière: Relativiste, quantique, interactive*, Seuil (2006)
- V. Scarani, A. Suarez, *Introducing quantum mechanics: One-particle interferences*, Am. J. Phys. **66** (1998)
- V. Scarani, *Interférences et corrélations quantiques*, Vuibert (2003)
- V. Scarani et al., *Six quantum pieces*, World Scientific (2010)
- A. Zeilinger, *General properties of lossless beam splitters in interferometry*, Am. J. Phys. **49** (1981)