


Mise en perspective didactique d'un dossier de recherche

Timothé Poulain

Formation et expériences d'enseignement

Parcours universitaire

2009 – 2014 Université Paris-Diderot	L2 de physique et de mathématiques		L3 et M1 Magistère de physique fondamentale
2014 – 2015 Université d'Aix-Marseille	M2 P3TMA		
2015 – 2018 Université Paris-Sud	Doctorat en physique LPT d'Orsay sous la direction de J.-C. Wallet <i>De la structure quantique de l'espace-temps et de sa relation à la théorie quantique des champs</i>		

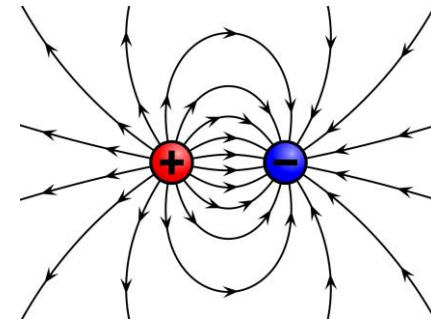
Activités d'enseignement

- 2010 – 2019 : **Soutien scolaire**
 - ~ 72 heures par an ;
 - niveau collège / lycée.
- 2015 – 2018 : **Monitorat**, département de physique, université Paris-Sud
 - 192 heures ;

L1 Mathématiques, physique et informatique	L2 Préparation au magistère et aux concours de physique	L3 Physique-chimie
<ul style="list-style-type: none">• TD de mécanique	<ul style="list-style-type: none">• TD d'électromagnétisme et de thermodynamique• TP de mécanique• Khôlles de physique	<ul style="list-style-type: none">• Cours d'informatique

Formation pédagogique

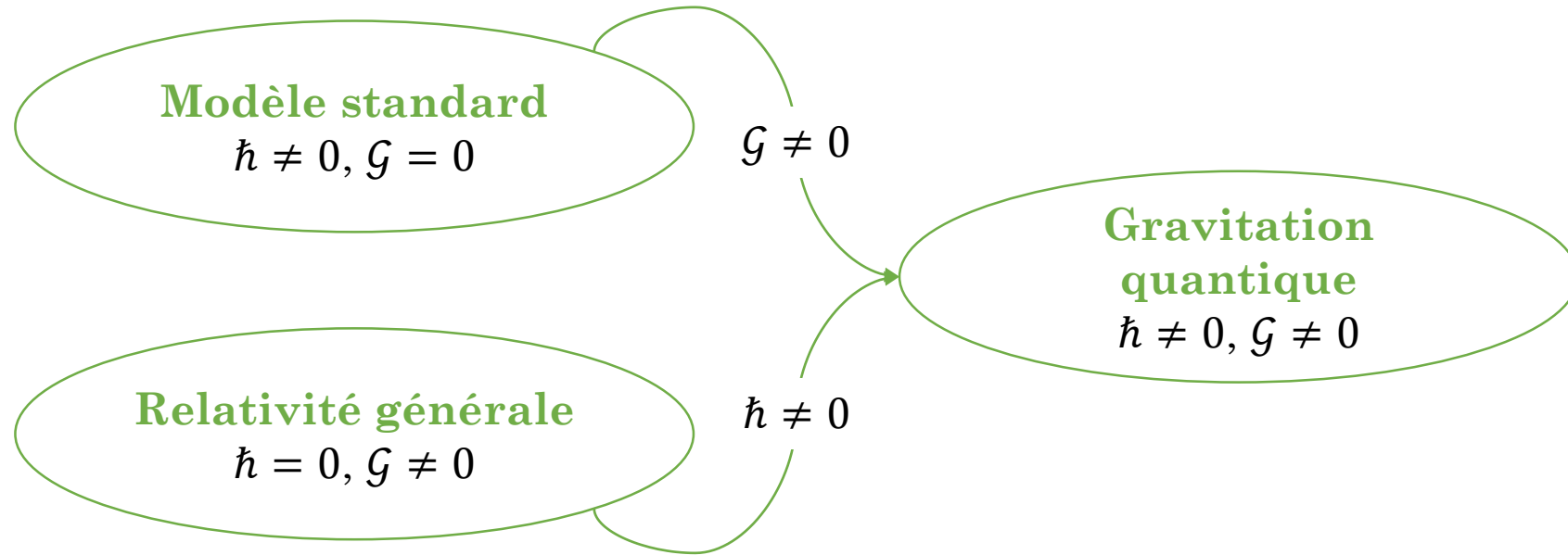
- Vocabulaire scientifique → difficultés chez les élèves.
exemple : la charge



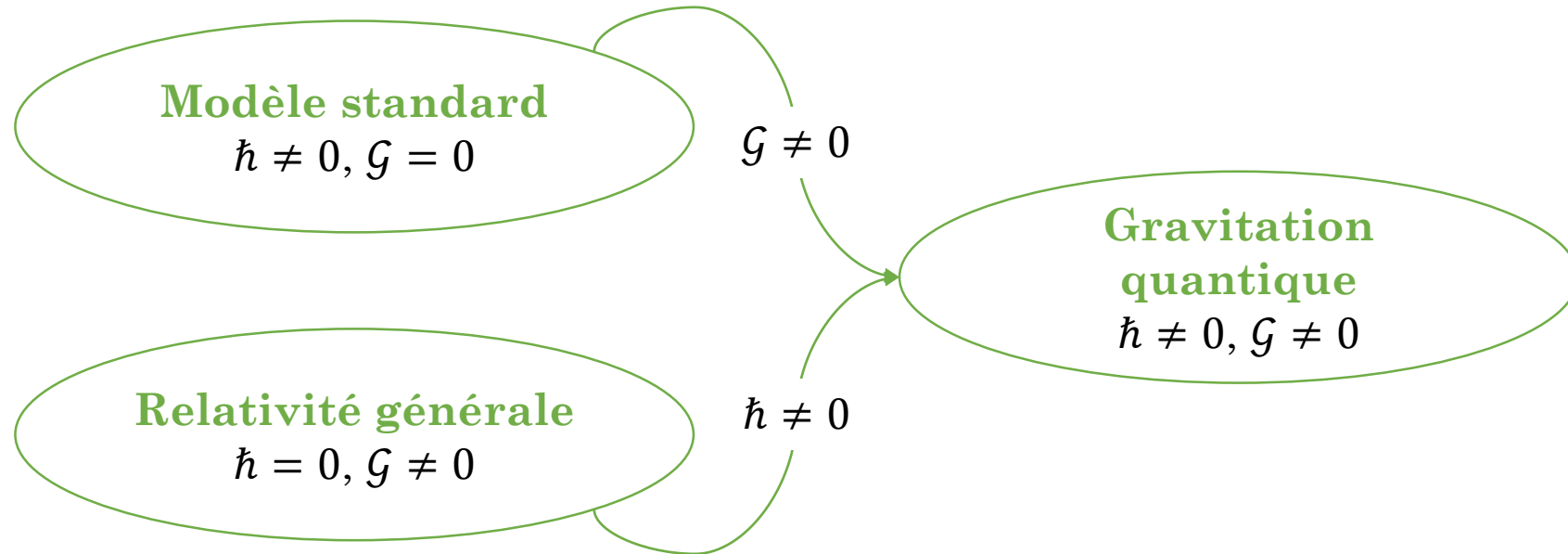
Faciliter l'appropriation des concepts et des principes physiques par les élèves.

Travaux de recherche

Vers une théorie de la gravitation quantique



Vers une théorie de la gravitation quantique



Remise en question de la nature de l'espace-temps à courte distance
→ 3 hypothèses

Première hypothèse

1. Il existe une échelle de longueur fondamentale ℓ

➤ analyse dimensionnelle :

ℓ	\hbar	G	c
L	$L^2 \cdot M \cdot T^{-1}$	$L^3 \cdot M^{-1} \cdot T^{-2}$	$L \cdot T^{-1}$

→ 4 paramètres

→ 3 dimensions

$$\ell \sim \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 10^{-35} \text{ m}$$

Première hypothèse

1. Il existe une échelle de longueur fondamentale ℓ

➤ analyse dimensionnelle :

ℓ	\hbar	G	c
L	$L^2 \cdot M \cdot T^{-1}$	$L^3 \cdot M^{-1} \cdot T^{-2}$	$L \cdot T^{-1}$

→ 4 paramètres

→ 3 dimensions

$$\ell \sim \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 10^{-35} \text{ m}$$

➤ problème de localisation spatio-temporelle :

sonder l'espace-temps δx

↓
photons d'énergie κ

inégalités de
Heisenberg :

$$\kappa \sim \frac{\hbar c}{\delta x}$$

courbure de
l'espace-temps

↓
trou noir

δx minimale

↓
 ℓ

Deuxième hypothèse

2. ℓ est un invariant relativiste


➤ loi de transformation \rightarrow groupe de symétries

Relativité restreinte \rightarrow groupe de Poincaré \rightarrow contraction longueur

Deuxième hypothèse

2. ℓ est un invariant relativiste

➤ loi de transformation \rightarrow groupe de symétries

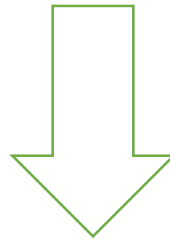
Relativité restreinte \rightarrow groupe  invariance \rightarrow contraction longueur

Deuxième hypothèse

2. ℓ est un invariant relativiste

- loi de transformation → groupe de symétries

Relativité restreinte → groupe de Poincaré → contraction longueur



groupe de symétrie de κ -Poincaré



$$\kappa = \frac{\hbar c}{\ell}$$

Troisième hypothèse

3. Analogie avec la mécanique quantique

➤ quantification de l'espace-temps

	Mécanique quantique	Gravitation quantique
Structures géométriques (<i>que l'on veut quantifier</i>)	Espace des phases (x, p)	Espace-temps ($x_0 = ct, x_1, x_2, x_3$)
Grandeurs fondamentales	\hbar	ℓ
Structures algébriques (<i>quantifiées</i>)	$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$	$\begin{cases} [\hat{x}_0, \hat{x}_i] = i\ell\hat{x}_i \\ [\hat{x}_i, \hat{x}_j] = 0 \end{cases}, i, j = 1, 2, 3$

Quelques rappels de physique des particules...

Formalisme de la théorie quantique des champs

- Fonction de partition pour un champ ϕ :

$$Z = \int d\bar{\phi} d\phi e^{\frac{i}{\hbar} S(\bar{\phi}, \phi)}$$

← action classique

- Champ scalaire (théorie ϕ^4) :

$$S(\bar{\phi}, \phi) = \int d^4x \mathfrak{L}(\bar{\phi}, \phi)$$

densité lagrangienne →

Quelques rappels de physique des particules...

Formalisme de la théorie quantique des champs

- Fonction de partition pour un champ ϕ :

$$Z = \int d\bar{\phi} d\phi e^{\frac{i}{\hbar} S(\bar{\phi}, \phi)}$$

← action classique

- Champ scalaire (théorie ϕ^4) :

$$S(\bar{\phi}, \phi) = \int d^4x \mathcal{L}(\bar{\phi}, \phi) = \int d^4x \left(-\frac{1}{2} \bar{\phi}(x) (\partial^\mu \partial_\mu + m_0^2) \phi(x) + \frac{g_0}{4!} |\phi(x)|^4 \right)$$

← densité lagrangienne

terme cinétique :

équation du mouvement (Euler-Lagrange)
⇒ éq. de propagation pour une onde de matière :
 $(\square + m_0^2) \phi(x) = 0$

← terme d'interaction

- Champ scalaire → boson de Higgs.

Quelques rappels de physique des particules...

Théorie des perturbations

- Calcul exact de Z difficile \rightarrow *hypothèse* : couplage faible $g_0 \ll 1$
- Fonction de corrélation à 2 points :
Amplitude de probabilité pour qu'une particule se propage de 1 vers 2

$$1 \text{---} \text{[solid circle]} \text{---} 2 = 1 \text{---} 2 + g_0 \cdot 1 \text{---} \text{[loop]} \text{---} 2 + O(g_0^2)$$

- Fonction de corrélation à 4 points :
Amplitude de probabilité pour que deux particules interagissent

$$1 \text{---} 2 \text{---} 3 \text{---} 4 \text{ [solid circle]} = + g_0 \cdot \left[\begin{array}{c} 1 \text{---} 4 \\ 2 \text{---} 3 \end{array} \text{ [crossing]} + \begin{array}{c} 1 \text{---} 4 \\ 2 \text{---} 3 \end{array} \text{ [crossing with loop]} + \begin{array}{c} 1 \text{---} 4 \\ 2 \text{---} 3 \end{array} \text{ [crossing with bubble]} \right] + O(g_0^2)$$

Premiers résultats : champ scalaire dans κ -Minkowski

- *Hypothèses :*
 1. Invariance par changement de référentiel (transformations de κ -Poincaré) ;
 2. Retrouver la théorie ϕ^4 dans la limite des basses énergies $E \ll \kappa$.

- *Expression de l'action :*

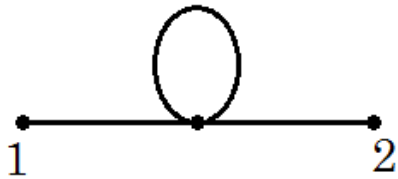
$$S_\kappa(\bar{\phi}, \phi) = \int d^4x \, \mathfrak{L}_\kappa(\bar{\phi}, \phi)(x),$$

avec $\mathfrak{L}_\kappa(\bar{\phi}, \phi)(x) \xrightarrow{\kappa \rightarrow \infty} -\frac{1}{2} \bar{\phi}(x) (\partial^\mu \partial_\mu + m_0^2) \phi(x) + \frac{g_0}{4!} |\phi(x)|^4$.

- a. Terme cinétique $\mapsto f(m_0, \kappa, \partial_\mu)$ non triviale ;
- b. Interaction locale \mapsto interaction non-locale.

Calcul des fonctions de corrélation

- Fonction de corrélation à 2 points :



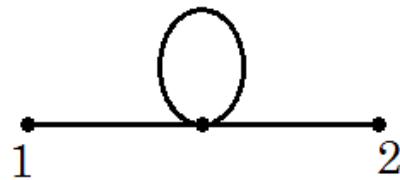
le premier terme
correctif diverge



Mauvaise définition des
paramètres du lagrangien
 \Rightarrow Procédure de renormalisation
 $m_0 \mapsto m_r(\mathcal{E})$

Calcul des fonctions de corrélation

- Fonction de corrélation à 2 points :



le premier terme
correctif diverge

Mauvaise définition des
paramètres du lagrangien
 \Rightarrow Procédure de renormalisation
 $m_0 \mapsto m_r(\mathcal{E})$

- Fonction de corrélation à 4 points :



absence de
divergence

La constante de couplage
ne dépend pas de l'échelle
d'énergie \mathcal{E}

Conclusion

- Gravitation quantique : nouveau paradigme
 - remise en question de la notion d'espace-temps ;
 - élaboration d'un modèle à partir de principes physiques fondamentaux (principe de relativité, arguments de symétrie...).

Sensibiliser les élèves à l'importance des concepts et des principes physiques.

Séquence pédagogique au lycée

Conception du mouvement et principe d'inertie

- *Niveau* : seconde ; • *Durée de la séance* : 1h30
- *Difficulté des élèves* : conceptualiser le lien entre force et mouvement.
- *Objectifs pédagogiques* :
 - clarifier ce lien en vue de l'introduction du principe d'inertie ;
 - développer l'esprit critique et scientifique des élèves.
- *Méthode* :
 1. guider les élèves dans un travail de réflexion ;
 2. réalisation d'une expérience ;
 3. mise en perspective avec l'histoire des sciences.

Première phase : la notion vue par les élèves

- *Objectifs et intérêts :*
 - pour les élèves, formuler leurs idées à l'oral (conception initiale) ;
 - pour l'enseignant, identifier clairement les difficultés des élèves.
- *Mise en œuvre :*
 - répondre à la question : « la force est-elle nécessaire au mouvement ? » :
 - sans l'aide de l'enseignant : faire appel aux connaissances des élèves ;
 - avec l'aide de l'enseignant : aborder la question à travers des situations concrètes.
 - résumé des propositions.

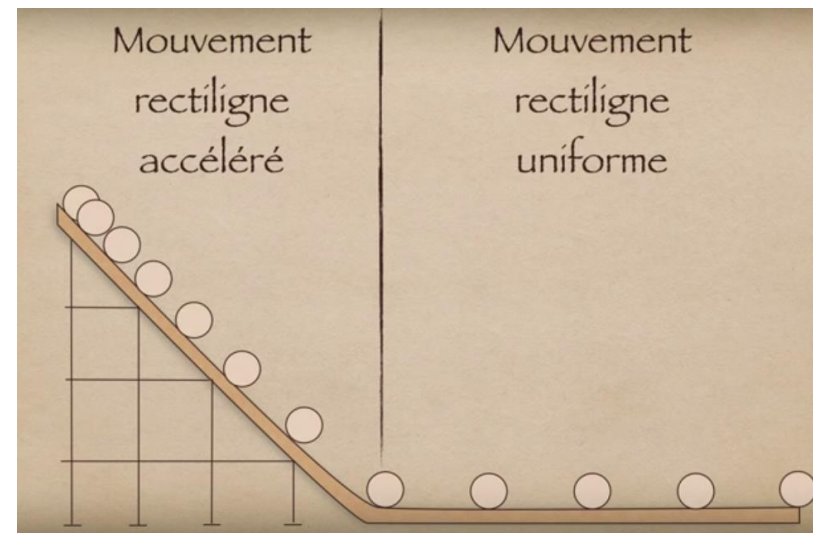
Deuxième phase : expérience du plan incliné de Galilée

- *Objectifs et intérêts :*
 - permettre aux élèves de vérifier leur intuition par l'expérience ;
 - corriger leur conception initiale à partir des observations.
- *Mise en œuvre :*

Etape n°1



Etape n°2



Troisième phase : mise en perspective

- *Objectifs et intérêts :*
 - synthétiser les résultats obtenus ;
 - mettre en perspective l'évolution de la conception du mouvement chez les élèves avec l'histoire des sciences.
- *Mise en œuvre :*

Vision d'Aristote :
« *Un corps en mouvement s'arrête quand la force qui le pousse ne peut plus agir de façon à le pousser.* »



Expérience

Vision de Galilée :
« *Le mouvement perdure dans son état de translation rectiligne uniforme tant qu'aucune force ne vient perturber son mouvement.* »















Merci pour votre attention

Annexes

Question du jury

Le boson de Higgs en CPGE

- Modèle standard → particules élémentaires

Fermions					Bosons	
Quarks	Masse	$\approx 2,3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1275 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 173210 \text{ MeV}/c^2$	0	$\approx 126000 \text{ MeV}/c^2$
	Charge	2/3	2/3	2/3	0	0
	Spin	1/2	1/2	1/2	1	0
						
		up	charm	top	gluon	boson Higgs
		$\approx 4,8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4180 \text{ MeV}/c^2$	0	
Leptons	Charge	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	Spin	1/2	1/2	1/2	1	
						
		down	strange	bottom	photon	graviton
	Masse	$0,511 \text{ MeV}/c^2$	$105 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1777 \text{ MeV}/c^2$	$91200 \text{ MeV}/c^2$	
	Charge	-1	-1	-1	0	
Leptons	Spin	1/2	1/2	1/2	1	
						
		électron	muon	tauon	boson Z	
		$< 0,0000022 \text{ MeV}/c^2$	$< 0,17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15,5 \text{ MeV}/c^2$	$80400 \text{ MeV}/c^2$	
						
		neutrino électr.	neutrino muon.	neutrino tauique	boson W	

- Boson de Higgs :
 - 1964 : prédiction par Brout, Englert et Higgs ;
 - 2012 : découverte au CERN ;
 - 2013 : prix Nobel de physique.

Question du jury

Pourquoi a-t-on besoin du boson de Higgs ?

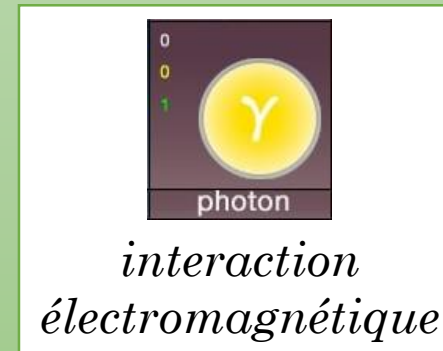
- Transmission des interactions fondamentales par des particules médiatrices

Exemple :

- photon \rightarrow rayonnement (\vec{E}, \vec{B})

$$\Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{0}$$

- potentiel scalaire V et potentiel vecteur \vec{A}
 \rightarrow transformations de jauge et invariance éq. de Maxwell.



- Invariance des lois physiques par transformation de jauge
 \Leftrightarrow particules médiatrices de masse nulle

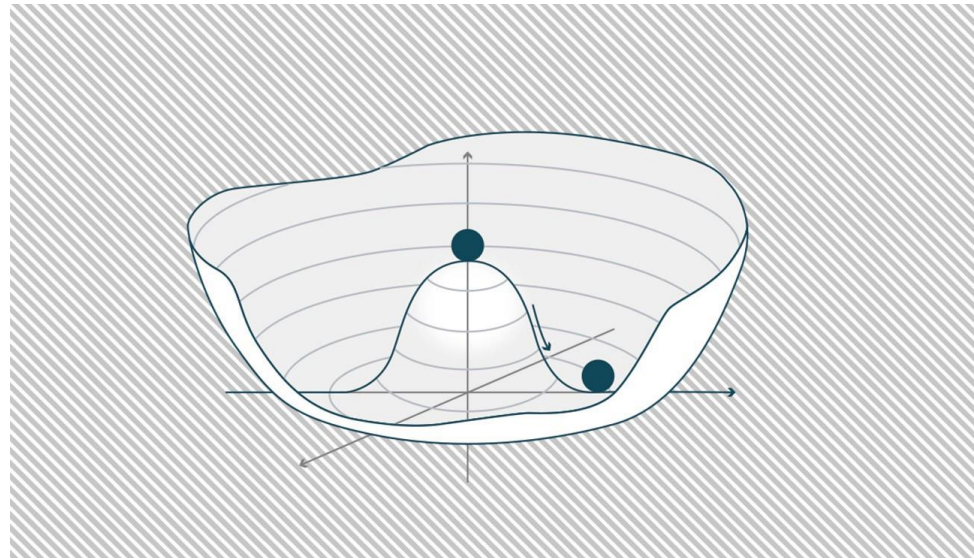


mécanisme de Brout-Englert-Higgs

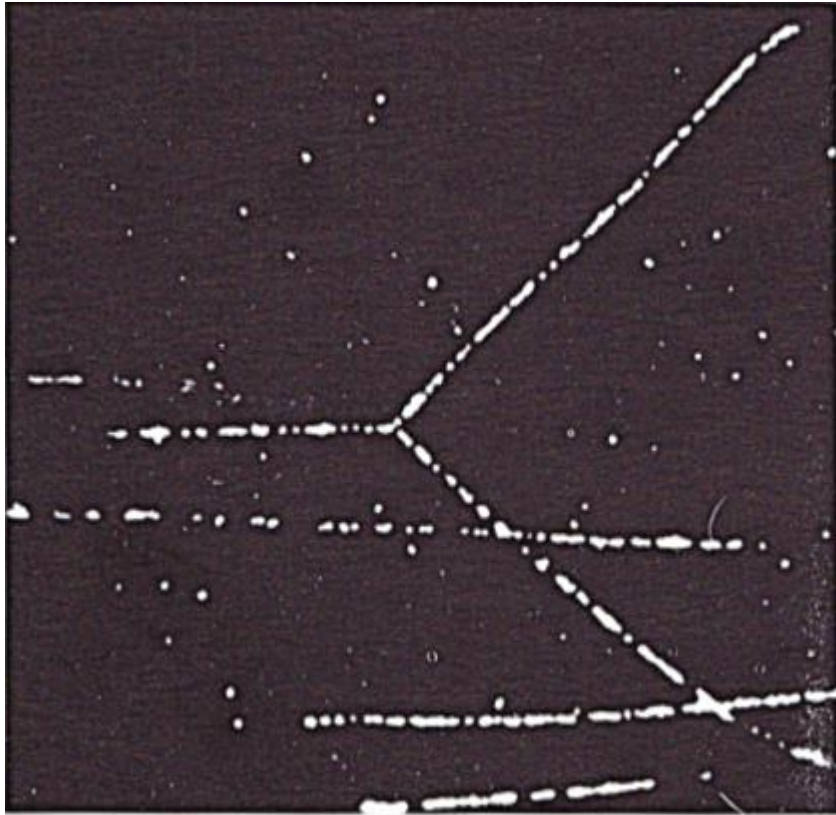
Question du jury

Mécanisme de Brout-Englert-Higgs

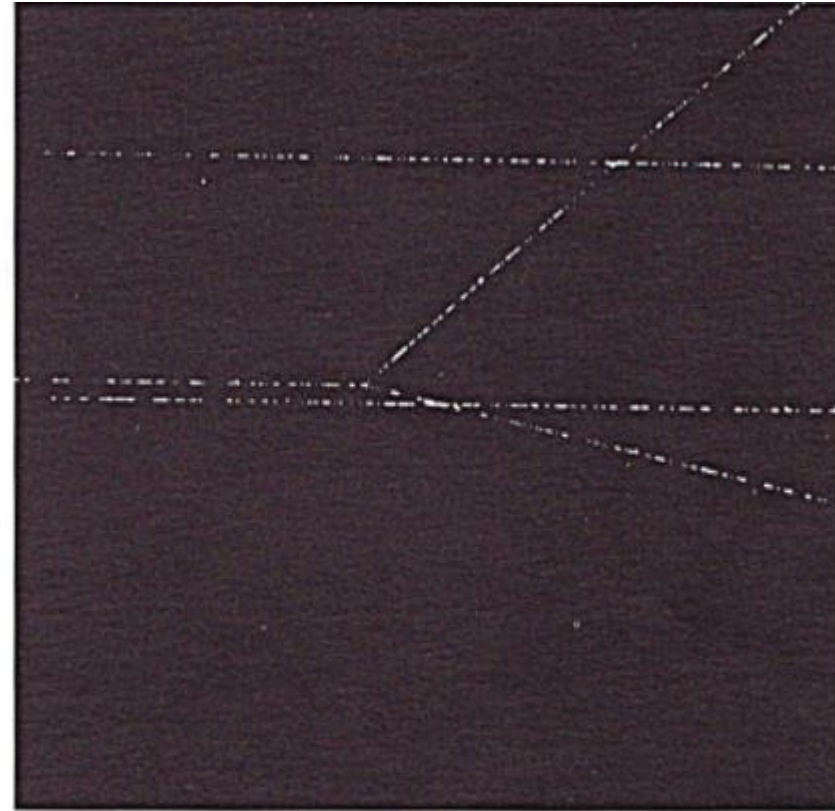
- Interaction avec le boson de Higgs → particules élémentaires acquièrent leur masse
- L'état du vide (quantique) connaît une transition de phase lors de la brisure de symétrie électro-faible aux premiers instants de l'univers.



Question du jury



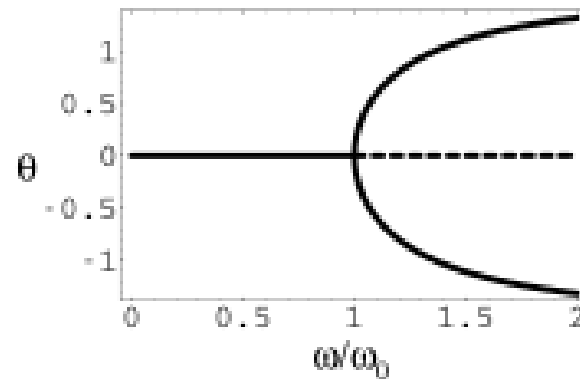
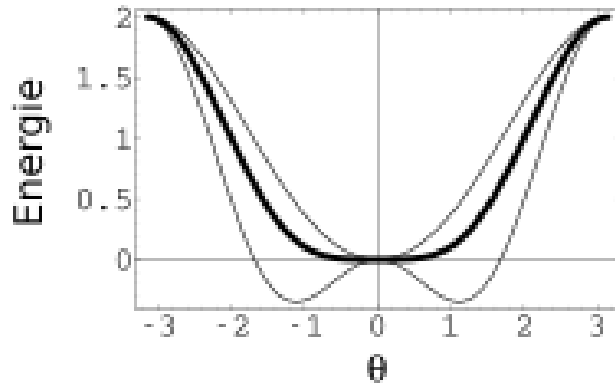
(a)



(b)

Pendule conique

$$E_p = \frac{mg\ell}{2} \left(1 - \cos \theta - \frac{\omega^2}{2\omega_0^2} \sin^2 \theta \right) \approx \frac{mg\ell}{4} \left(\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right) \theta^2 - \left(1 - \frac{8\omega^2}{\omega_0^2} \right) \theta^4 \right) + \dots$$



Pour $\omega < \omega_0$, unique minimum : $\theta = 0$.
Pour $\omega > \omega_0$, deux minima : $\pm\theta_0 \neq 0$.

Ces figures montrent l'analogie entre bifurcations et théorie de Landau des transitions de phase, l'énergie potentielle tenant ici lieu d'énergie libre. L'analogie est obtenue en prenant l'angle θ comme l'analogue du paramètre d'ordre dans les théories de Landau et la théorie en ϕ^4 est obtenue par un développement limité de E_p pour des petits angles θ . [Attention à la limite de l'analogie : le coefficient du terme en θ^4 dépend de ω .]

Question du jury

Ondes gravitationnelles au lycée

À propos du programme de terminale :

- Interférences et interférométrie ;
- Limites de la mécanique newtonienne.



Prérequis :

- Franges d'interférence ;
- Ondes électromagnétiques ;
- Mécanique et gravitation.

➤ Objectif et intérêt pédagogiques :

- Mettre en relation différents thèmes du programme ;
- Initier les élèves à la physique moderne à travers l'actualité scientifique.

Question du jury

Expliquer les ondes gravitationnelles en CPGE

- Prérequis :
 - Ondes électromagnétiques ;
 - Franges d'interférence ;
 - Mécanique et gravitation.
- Objectif et intérêt pédagogiques :
 - mettre en relation différents thèmes du programme ;
 - initier les élèves à la physique contemporaine à travers l'actualité scientifique.

Question du jury

Description des ondes gravitationnelles

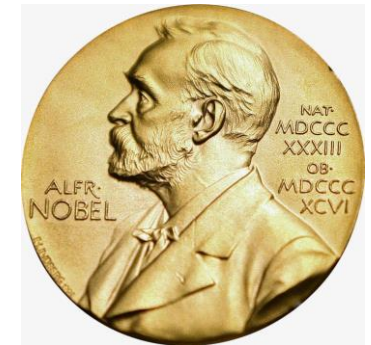
Pour Newton :
*La force est transmise
instantanément*

Pour Einstein :
*La force se propage à
la vitesse c*



Onde gravitationnelle
~
Onde électromagnétique

- Dates clés :
 - 1916 : **Prédiction** des ondes gravitationnelles par Einstein ;
 - 2015 : Première **détection** d'ondes gravitationnelles ;
 - 2017 : **Prix Nobel** de physique.
- L'espace-temps selon Einstein → [vidéo](#)
- Onde gravitationnelle = propagation d'une déformation de l'espace-temps

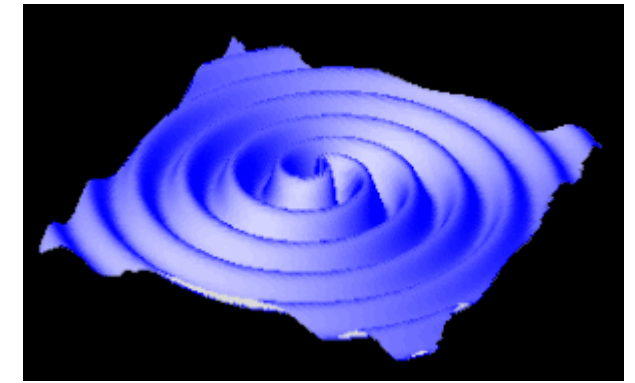


R.Weiss, B.C.Barish,
K.S.Thorne

Question du jury

Détection des ondes gravitationnelles

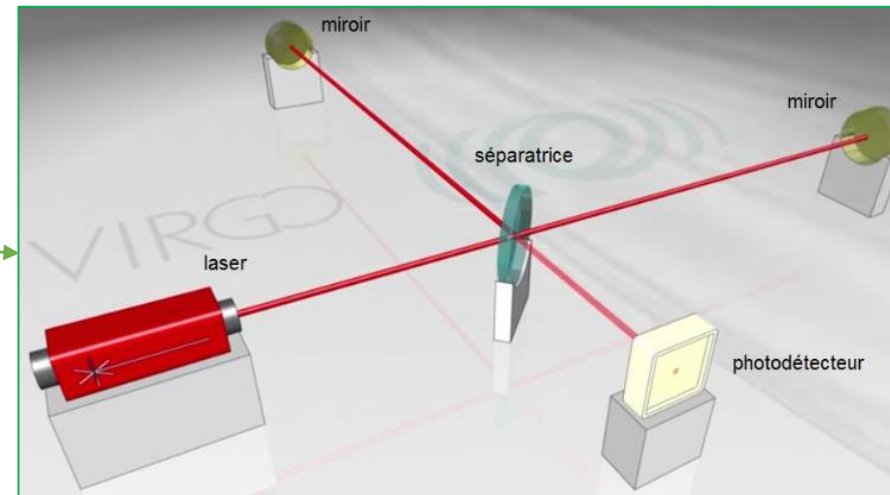
- Amplitude : $h = \frac{\text{taille déplacement}}{\text{taille de l'objet}} = \frac{2GM R^2}{rc^4 T^2} \approx 5 \times 10^{-19} \cdot \frac{MR^2}{rT^2}$
 M masse objet gravitant, R rayon de l'orbite, T période, r distance de détection.
- Interféromètre de Michelson : $L \sim 3 \text{ km} \rightarrow \Delta L \sim 10^{-17} \text{ m}$
 \rightarrow anneaux d'interférence



2 trous noirs en rotation
 $M \sim 10^{30} \text{ kg}$, $r \sim 30 \times 10^6 \text{ A. L.}$
 $\rightarrow h \sim 10^{-20}$



L'interféromètre Virgo en Italie



Les interactions fondamentales

intensité (adimensionnée) d'une interaction :

$$\alpha \sim \frac{V_0 d}{\hbar c},$$

V_0 l'échelle d'énergie typique du potentiel d'interaction, d la taille typique du système

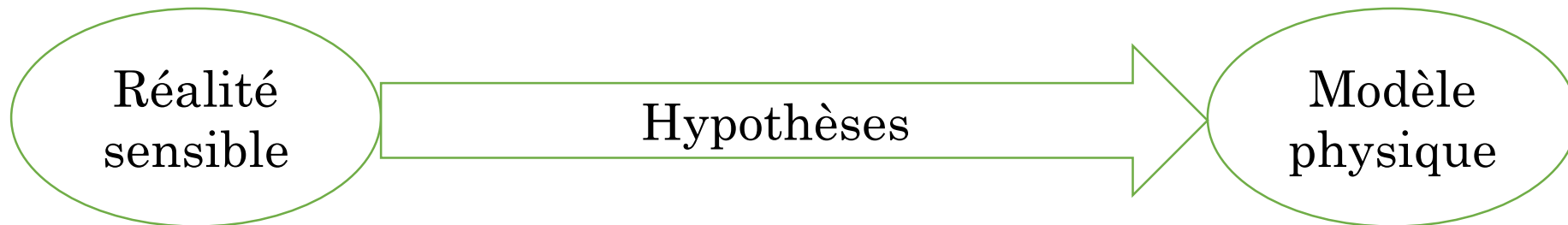
Interaction	Intensité <i>entre 2 protons</i>	Portée	Médiateur
nucléaire forte	1	10^{-15} m	8 gluons
électromagnétique	10^{-2}	∞	photon
nucléaire faible	10^{-6}	10^{-18} m	Z, W^+, W^-
gravitationnelle	10^{-39}	∞	graviton ?

exemple : constante de structure fine

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$$

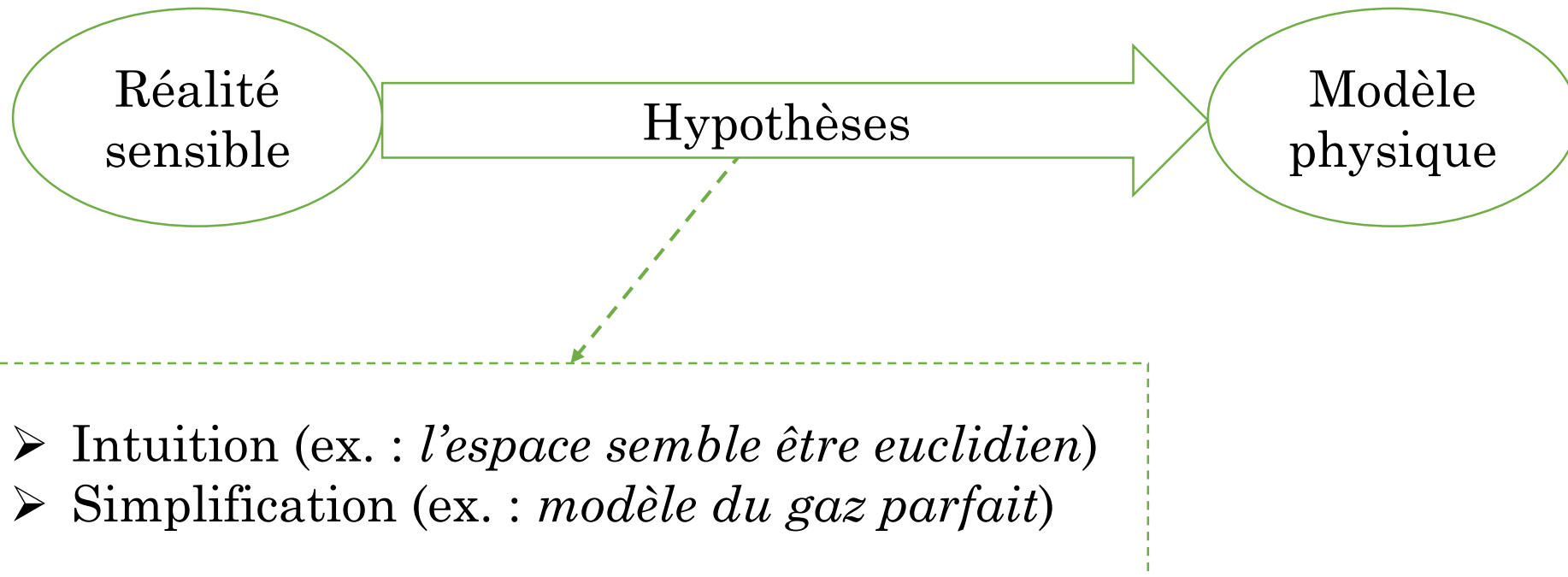
Question du jury

Quel peut être l'apport pédagogique et didactique de la recherche moderne en gravité quantique pour expliquer les différentes limites de validité de la physique classique ?



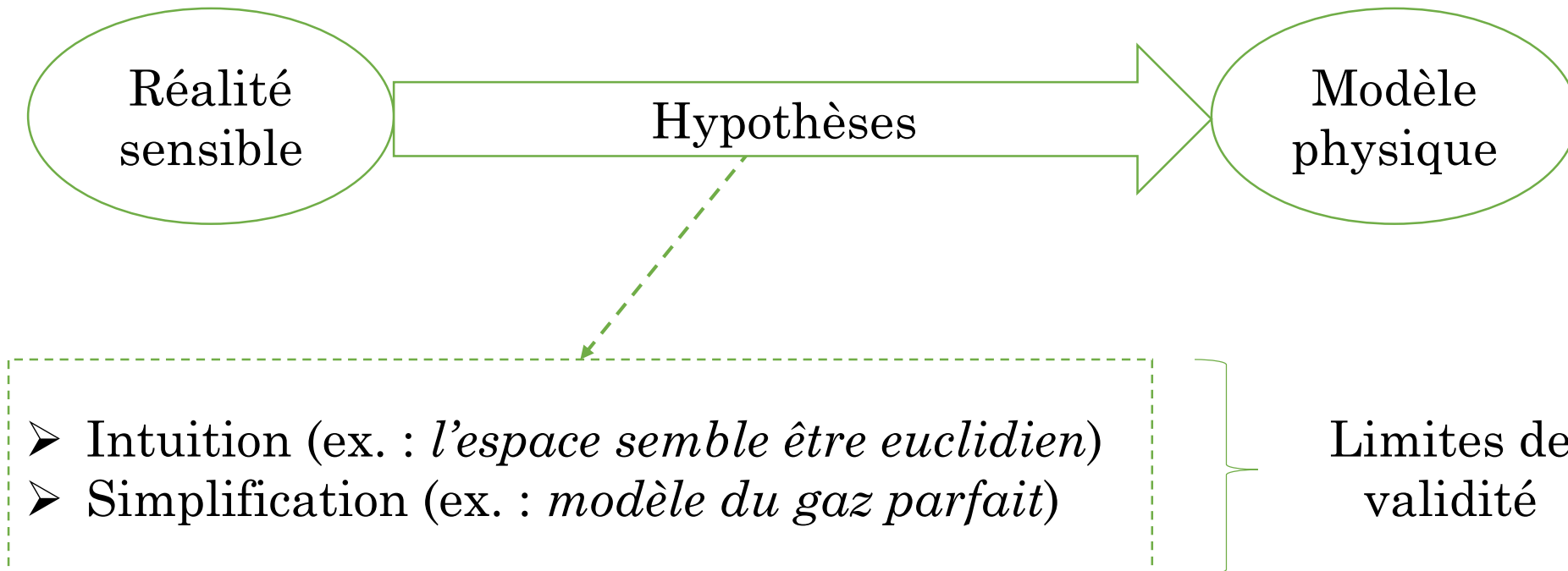
Question du jury

Quel peut être l'apport pédagogique et didactique de la recherche moderne en gravité quantique pour expliquer les différentes limites de validité de la physique classique ?



Question du jury

Quel peut être l'apport pédagogique et didactique de la recherche moderne en gravité quantique pour expliquer les différentes limites de validité de la physique classique ?



Question du jury

Danger : Interpréter la théorie comme évidente et absolue

Apport didactique :

- Actualité scientifique
- Enjeux de la gravitation quantique



Avoir conscience :

- Du rôle des hypothèses ;
- Des limites de validité.

Apport pédagogique :

- Mettre en perspective les savoirs enseignés

Conjectures

- Modèle standard → problèmes aux hautes énergies
→ théorie effective pour $E \ll \kappa$

