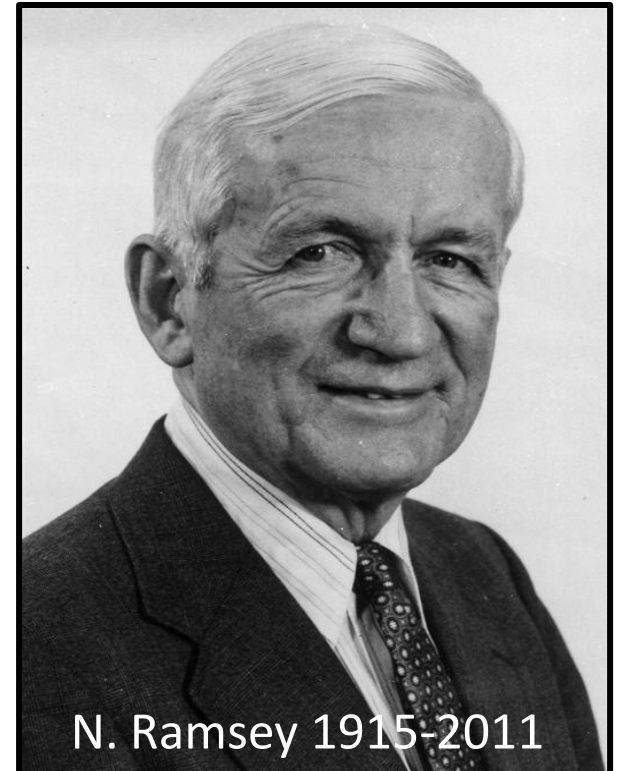
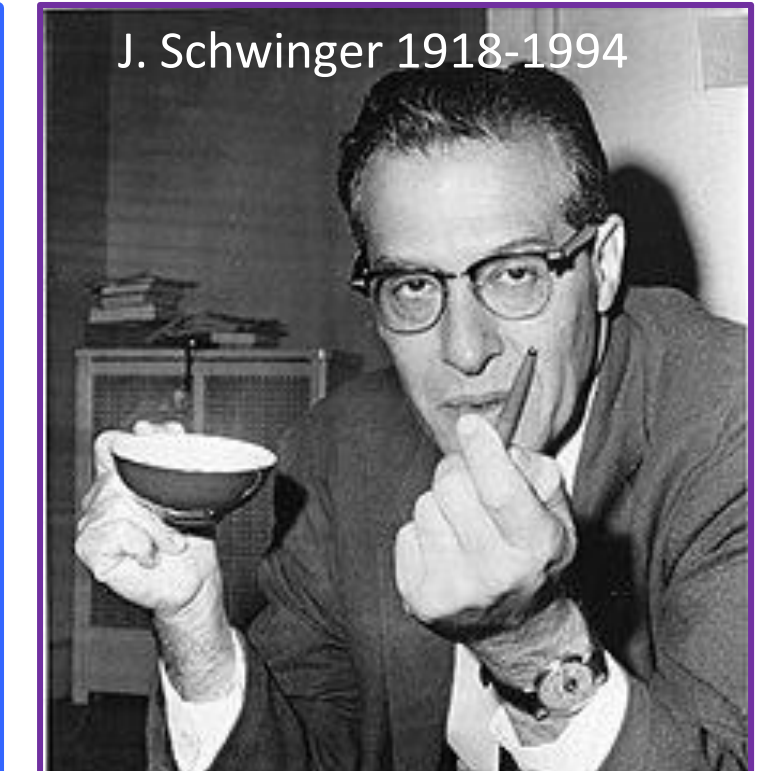


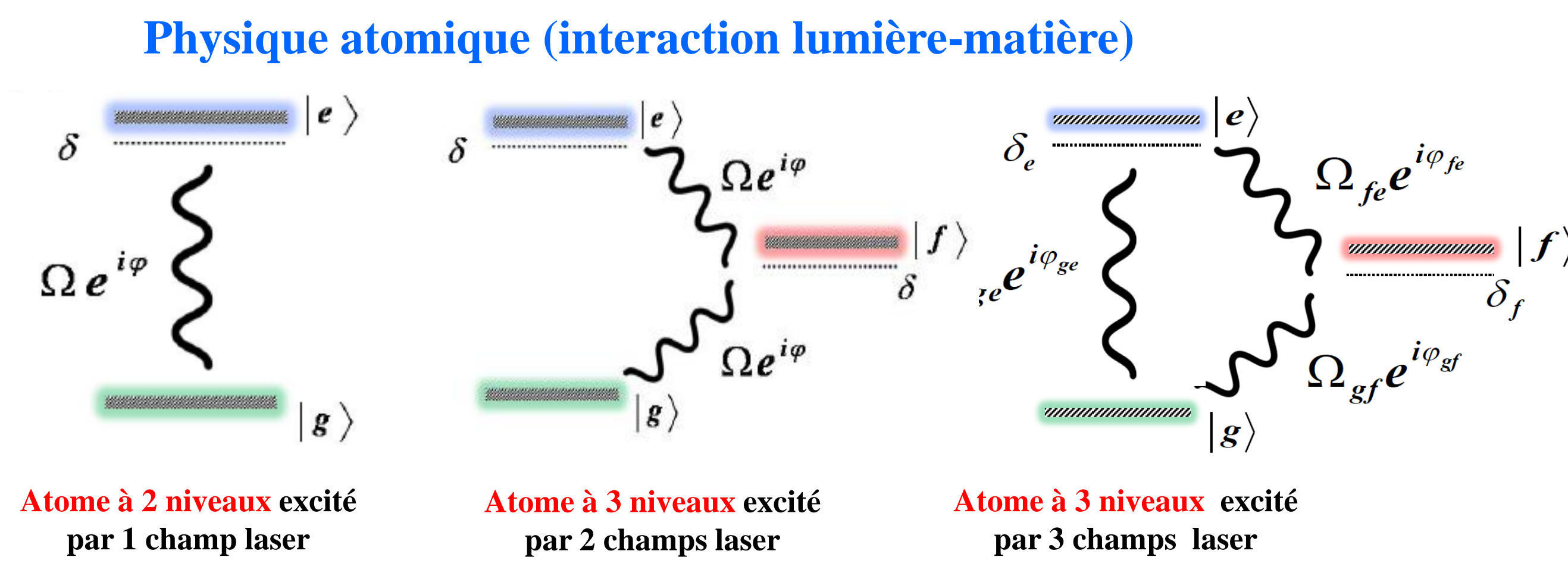
# Capteurs quantiques pour explorer les symétries SU(2) et SU(3)

Thomas Zanon-Willette\*  
 \*Sorbonne Université, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, LERMA, F-75005 Paris, France  
 D. Wilkowski, A. Taichenachev, V. Yudin

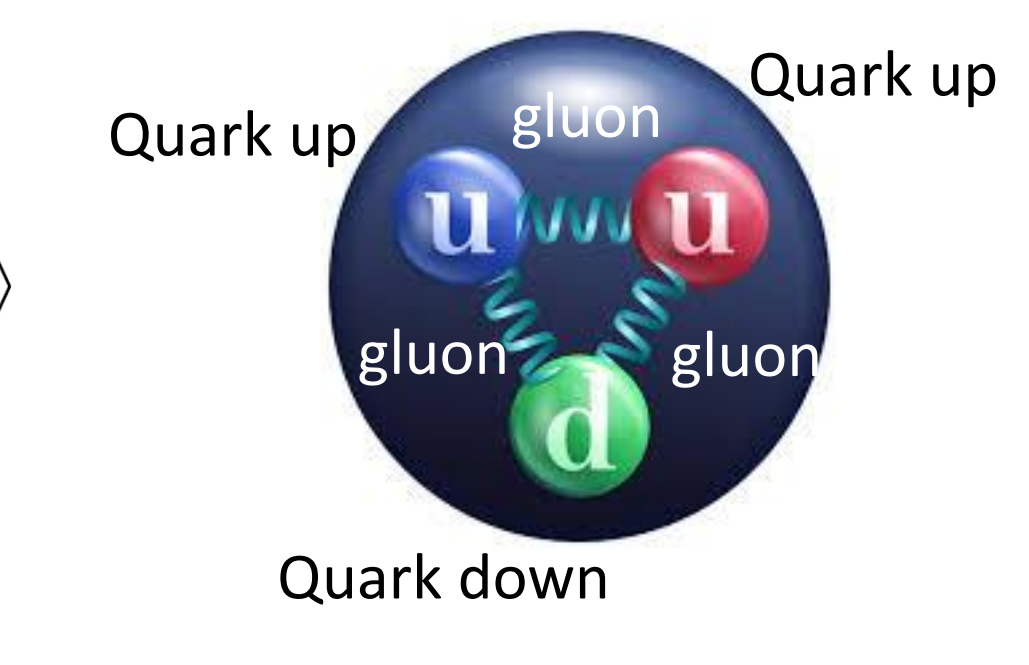


## I. Rotations, espaces SU(2)/ SU(3) et brisure de symétrie:

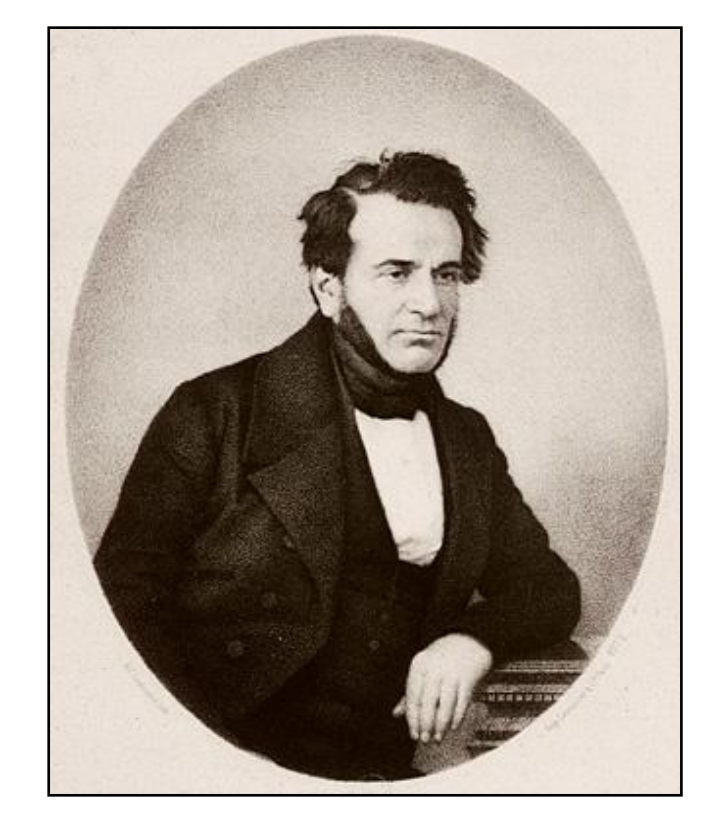
Posons le problème:



### Physique des particules (Classification de Gell-Mann 1964)



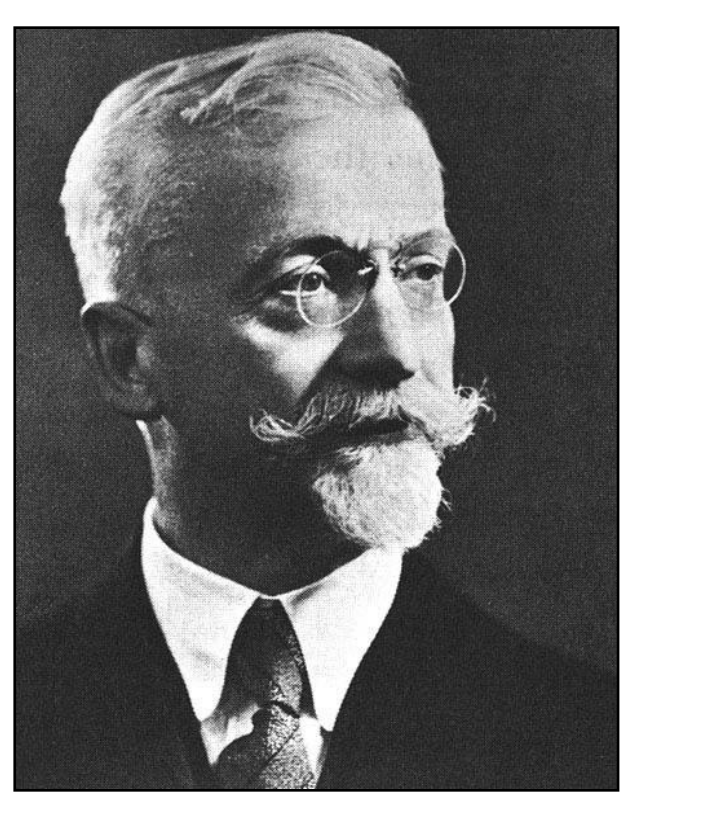
Tous les outils mathématique nécessaires



OLINDE RODRIGUES (1795-1851)



SOPHUS LIE (1842-1899)



ELIE CARTAN (1869-1951)

loi de composition « non abélienne » des rotations: formule de Rodrigues (1840)

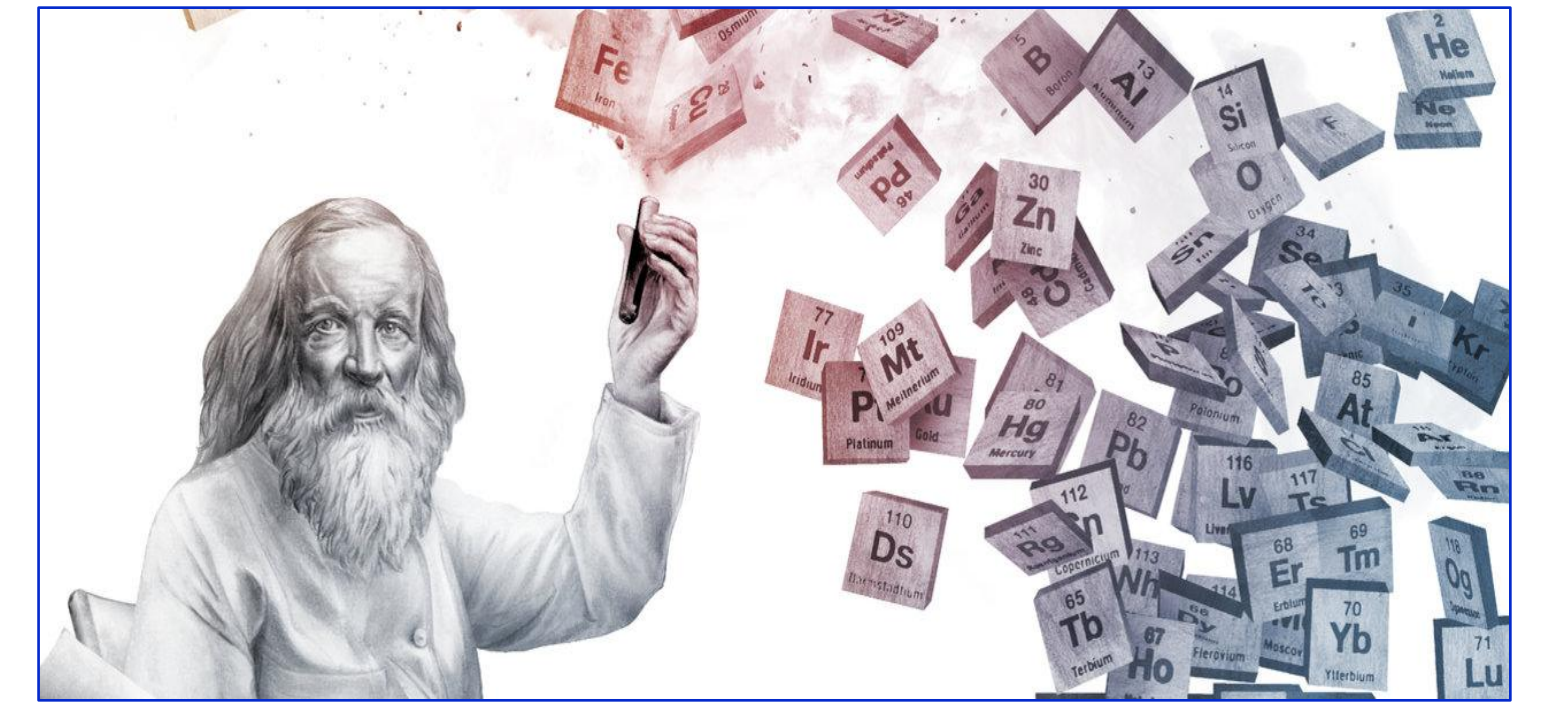
Crochet de Lie et groupe de rotation (1900)

Spineur et quaternion (1910)

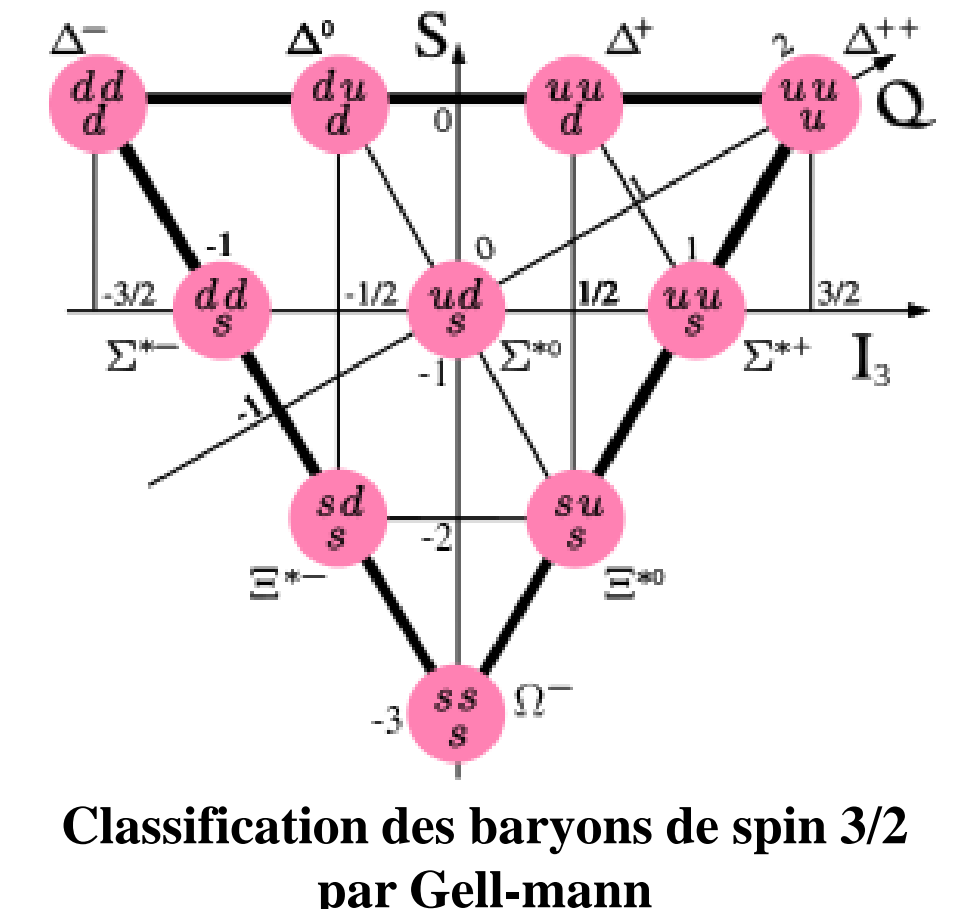
Quelle symétrie de rotation dans un espace vectoriel (Hilbert) ???  
 Représentation irréductible → brisure de symétrie

Un atome à 3,4,5,... niveaux peut-il se construire à partir d'un système quantique plus simple à 2 niveaux ?

Comprendre l'interaction d'un atome à plusieurs niveaux avec des champs laser impulsions → interférométrie de Ramsey

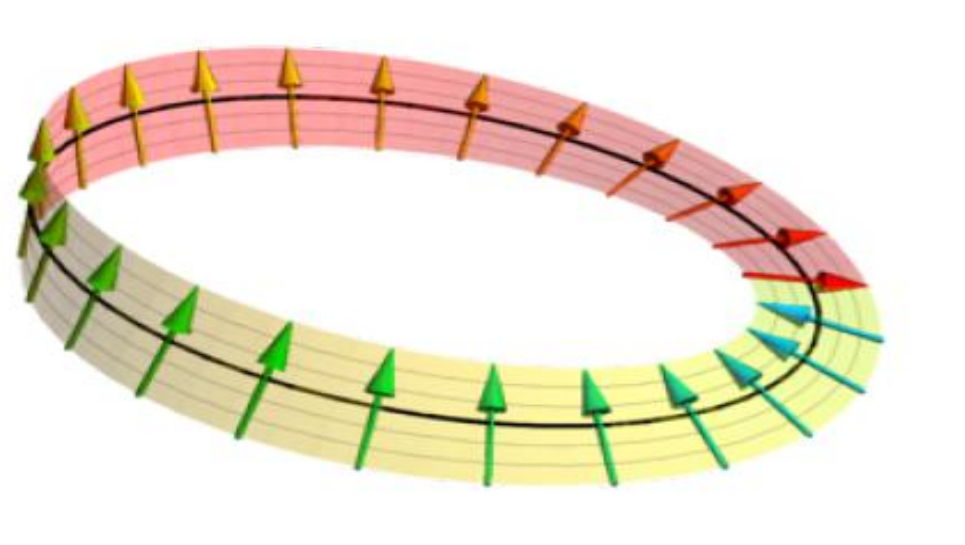


Classer les protocoles d'interrogation de type Ramsey à l'aide d'un diagramme  
 Identifier de nouveaux protocoles d'interrogation à partir du même diagramme

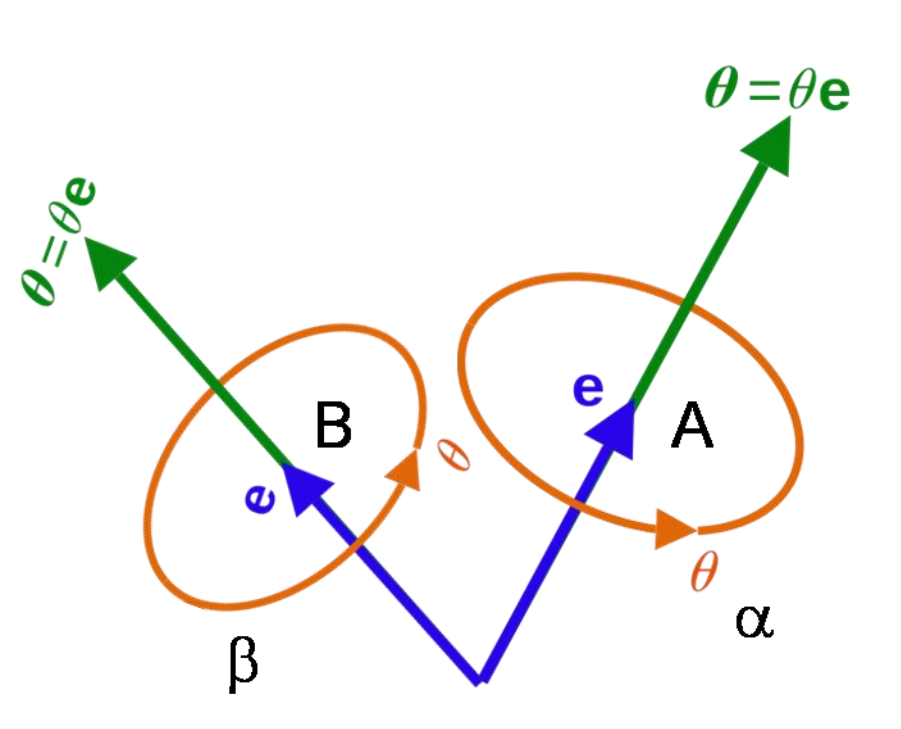


Classification des baryons de spin 3/2 par Gell-mann

▪ Ruban de Möbius et rotation de 4π (ou 720 degrés) (avec un stylo orienté perpendiculairement à la surface du ruban)



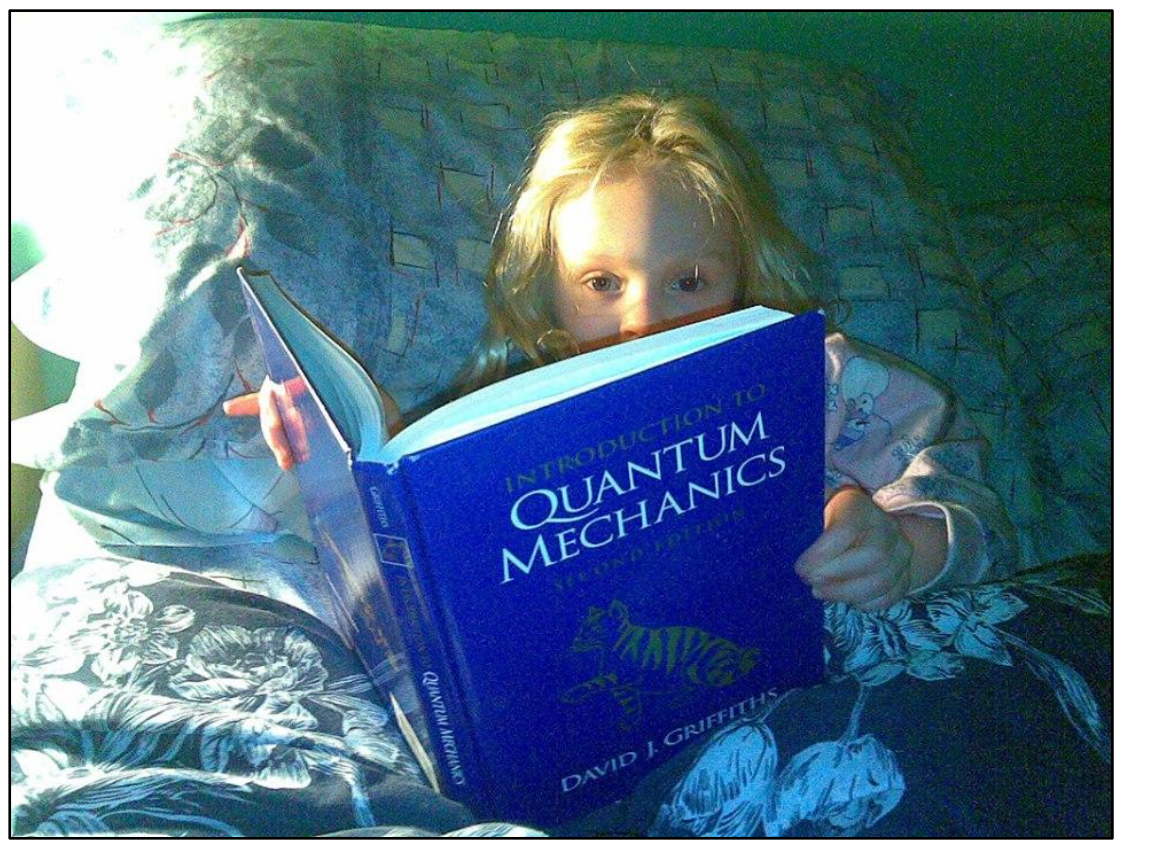
Ruban de Möbius et spineur



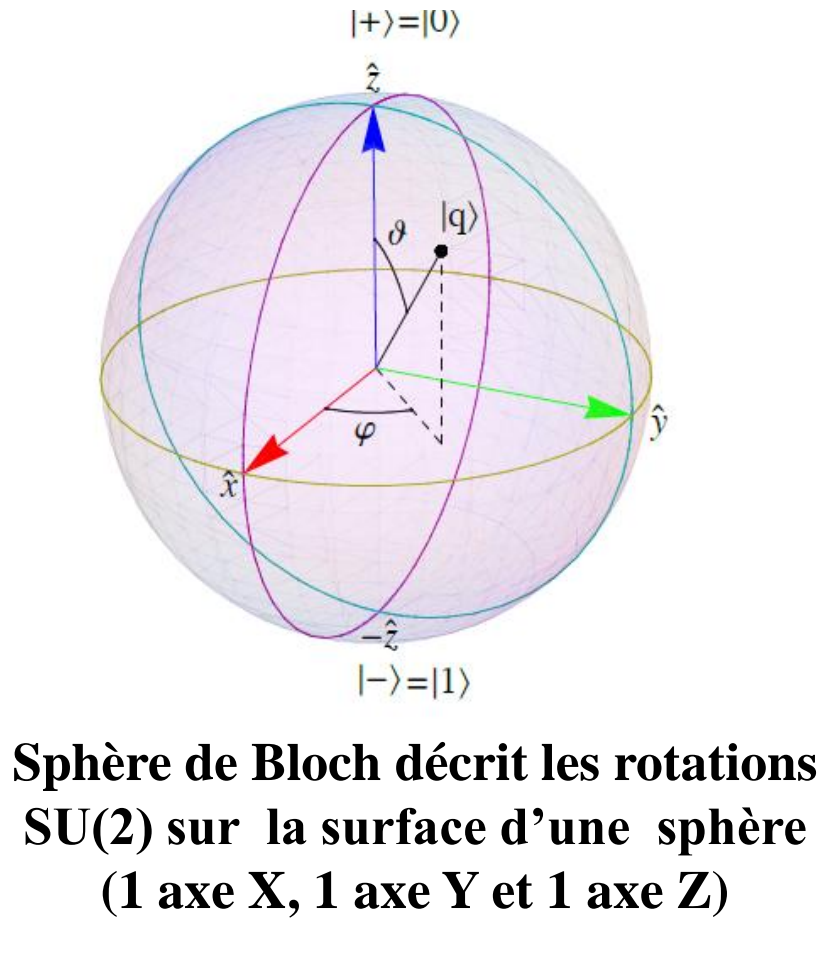
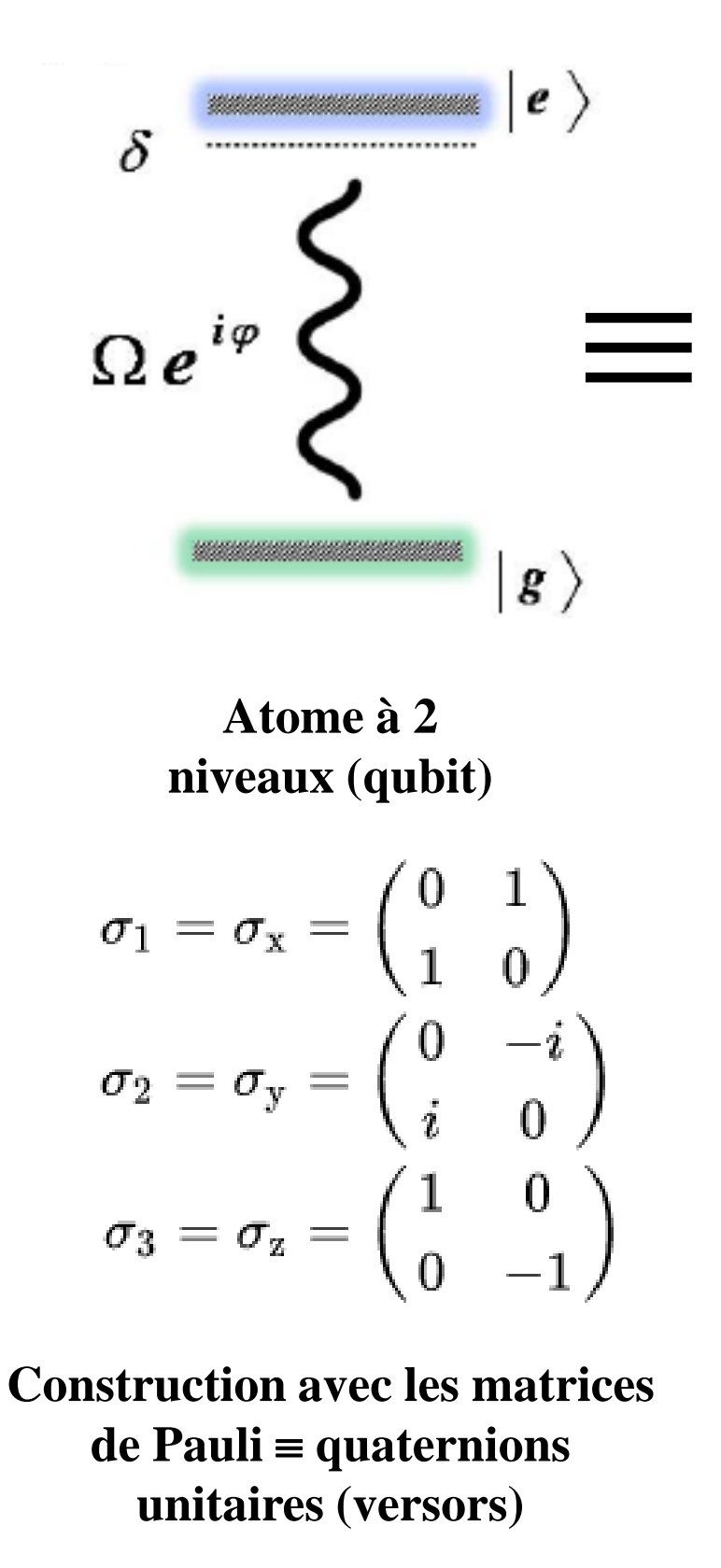
Produit vectoriel (brise la commutativité)

$$\tan \frac{\gamma}{2} C = \frac{\tan \frac{\beta}{2} B + \tan \frac{\alpha}{2} A + \tan \frac{\beta}{2} \tan \frac{\alpha}{2} B \times A}{1 - \tan \frac{\beta}{2} \tan \frac{\alpha}{2} B \cdot A}$$

Produit scalaire (conserve la commutativité)



## II. Rotation de saveur SU(2) et capteur quantique: interférométrie hyper-Ramsey (2010)



Sphère de Bloch décrit les rotations SU(2) sur la surface d'une sphère (1 axe X, 1 axe Y et 1 axe Z)

### Interféromètre de Ramsey 1950

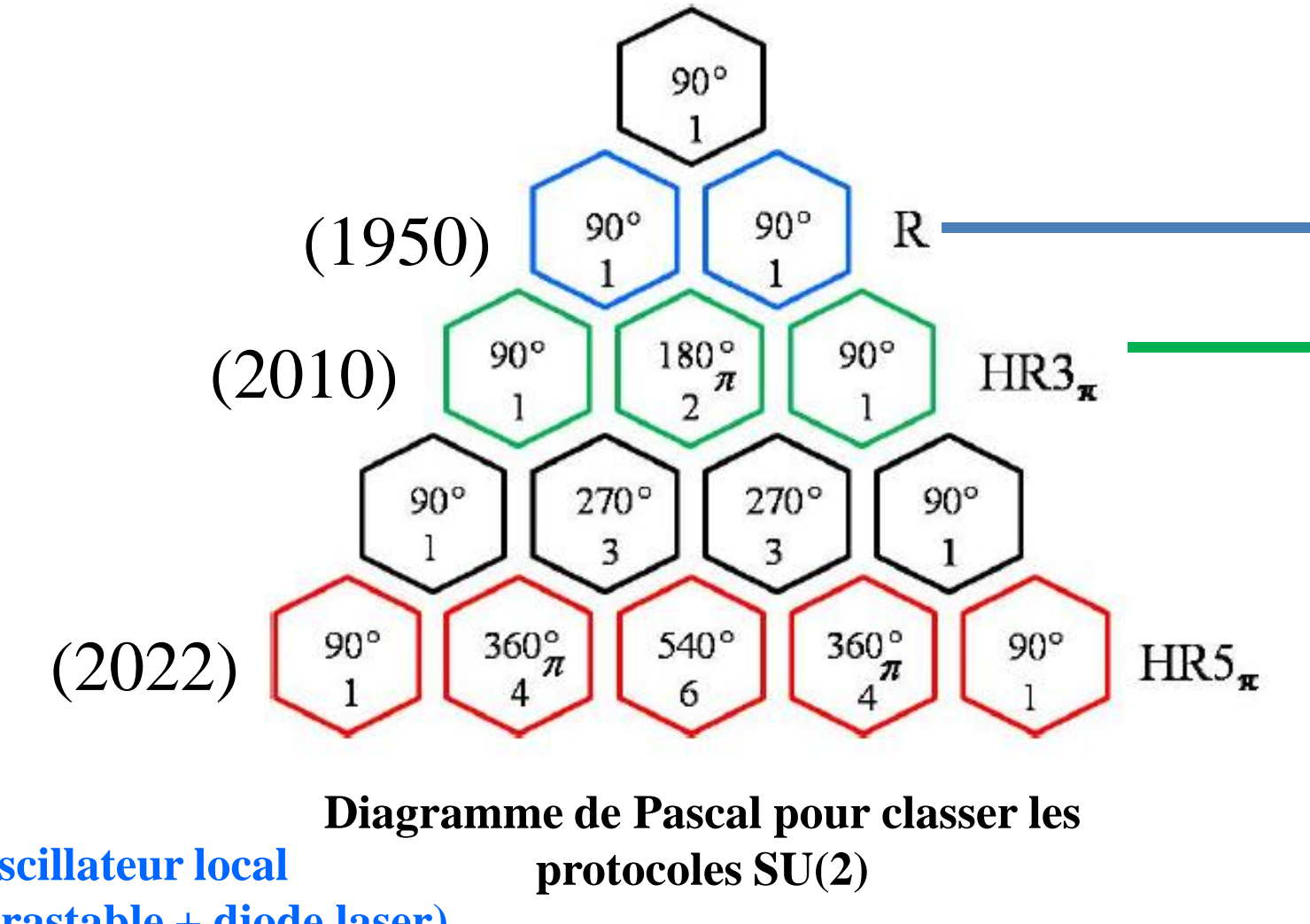
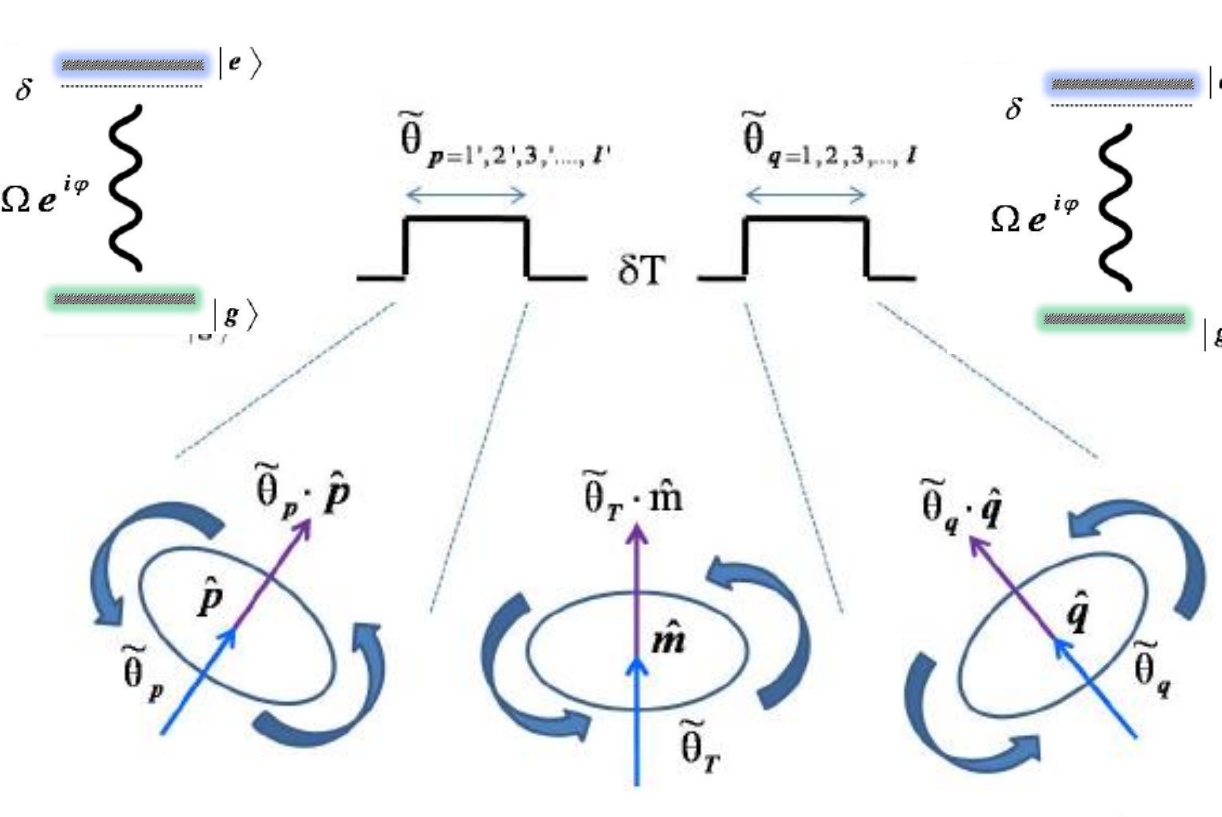
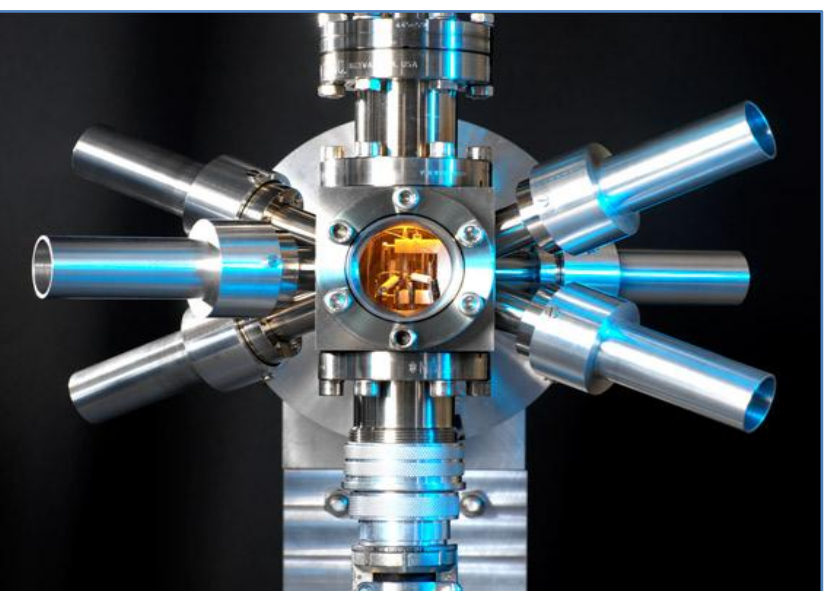


Diagramme de Pascal pour classer les protocoles SU(2)

Fontaine atomique de <sup>133</sup>Cs (1997) Δv/v ~ 10<sup>-16</sup>



Horloge optique à ion unique <sup>171</sup>Yb<sup>+</sup> (2016) Δv/v ~ 10<sup>-18</sup>

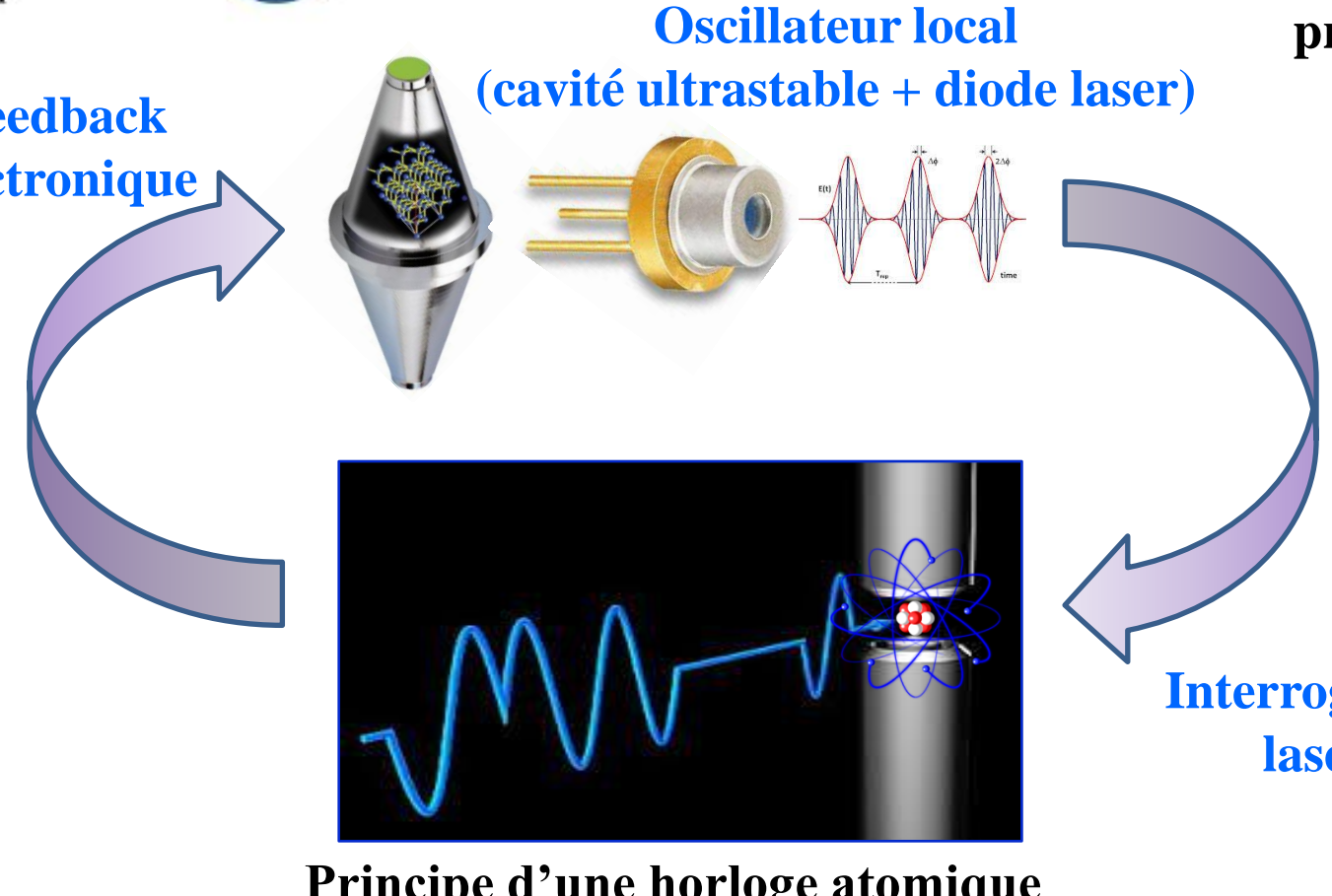
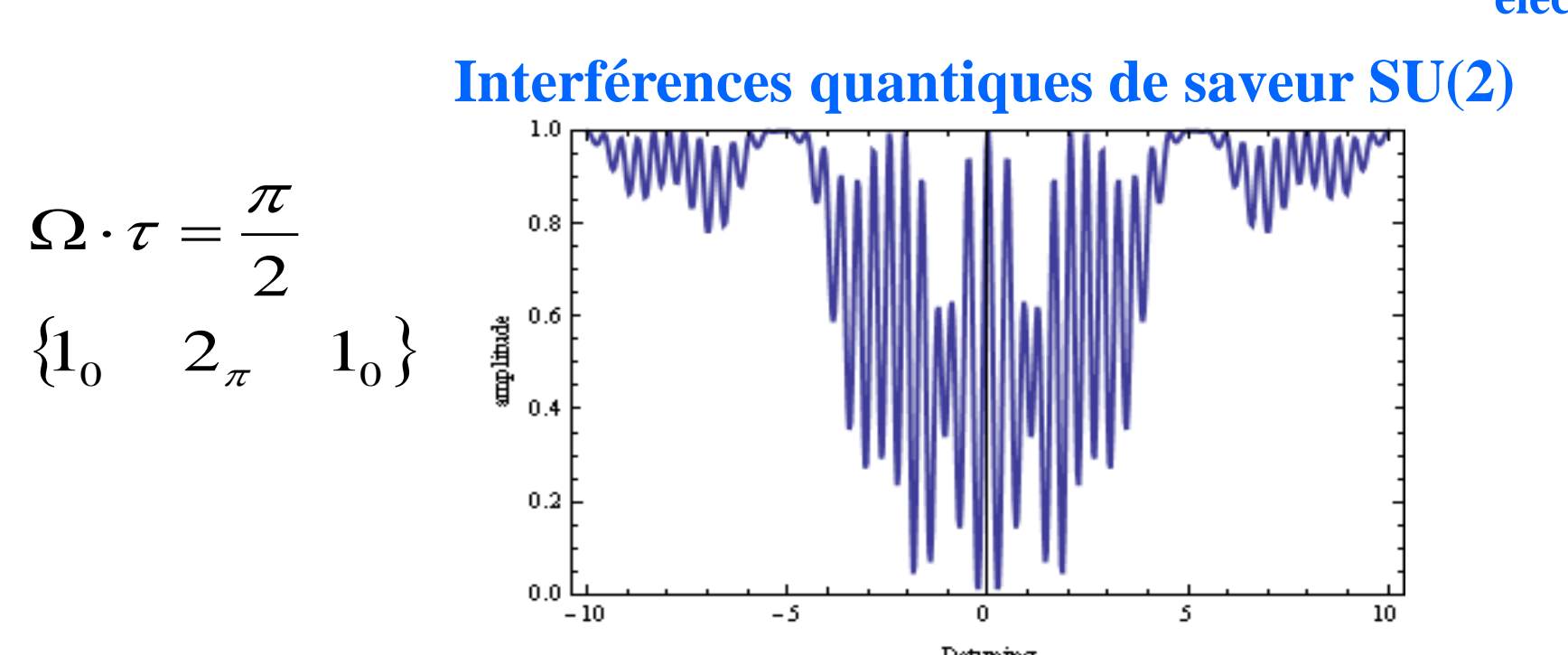


Construction avec les matrices de Pauli ≡ quaternions unitaires (versors)

$$\sigma_1 = \sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

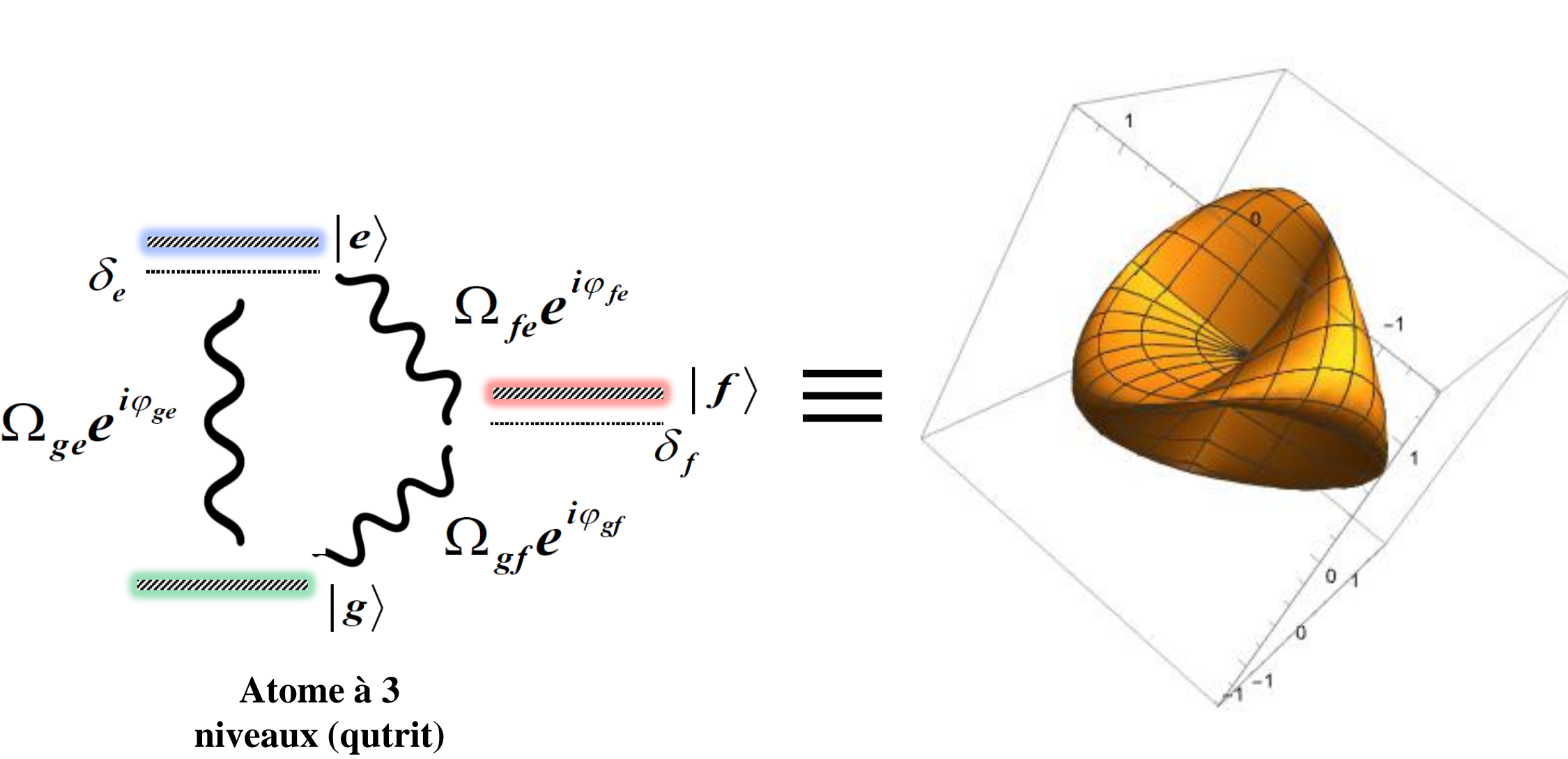
$$\sigma_2 = \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_3 = \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

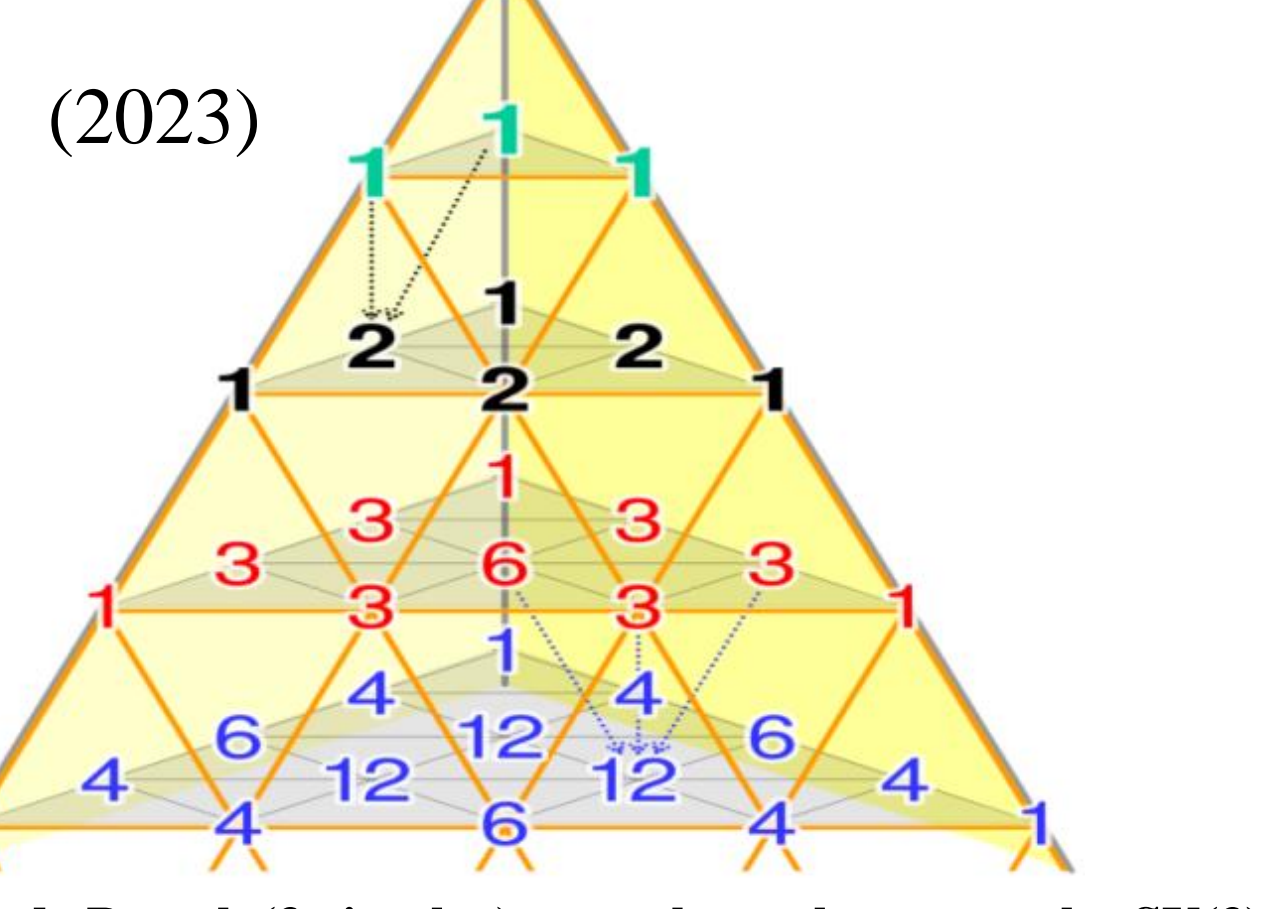
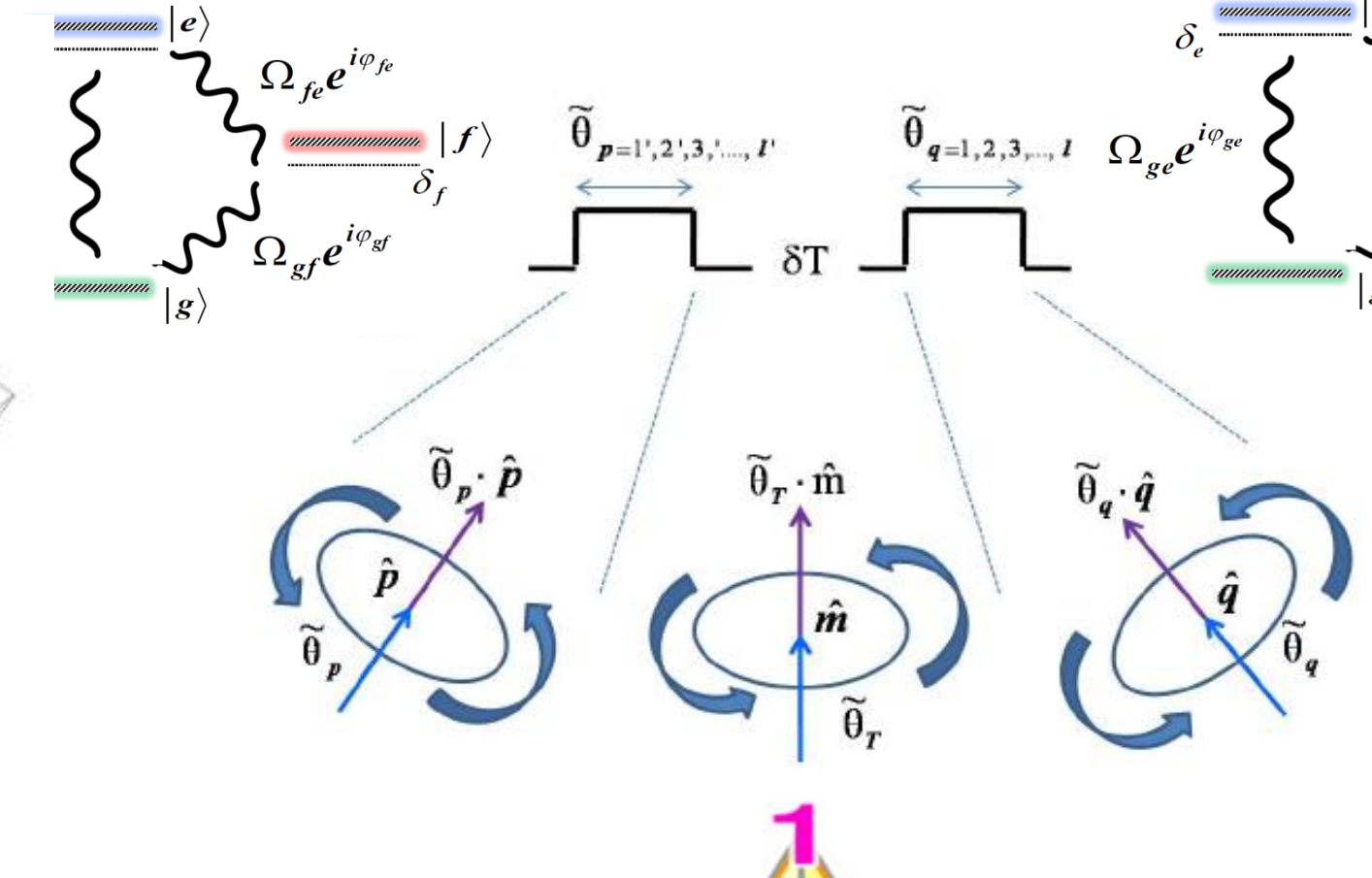


Principe d'une horloge atomique

## III. Interférométrie de Ramsey SU(3):

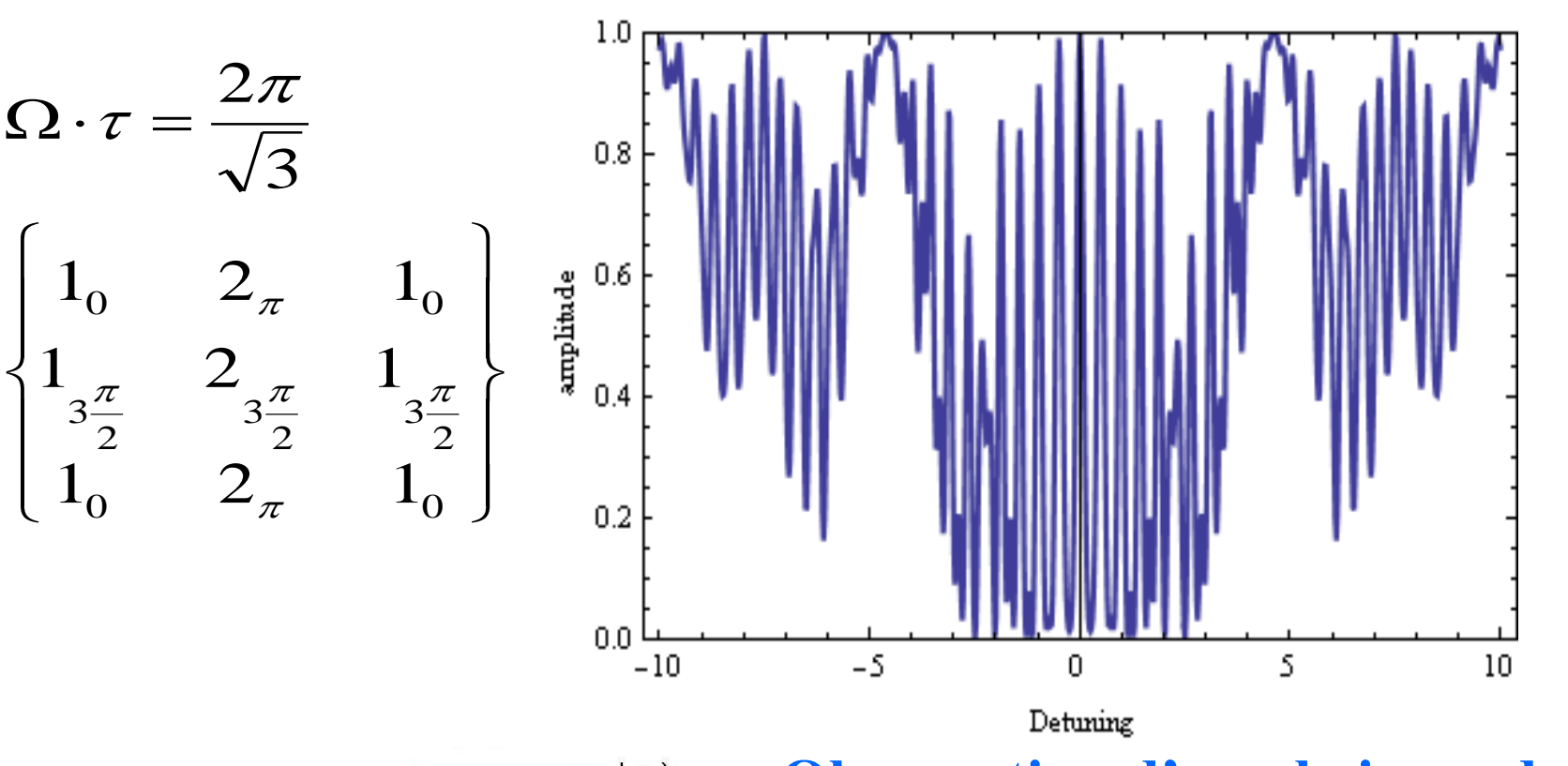


La surface romaine de Steiner décrit une partie des rotations SU(3) sur une surface à 8 dimensions (3 axes X, 3 axes Y et 2 axes Z)

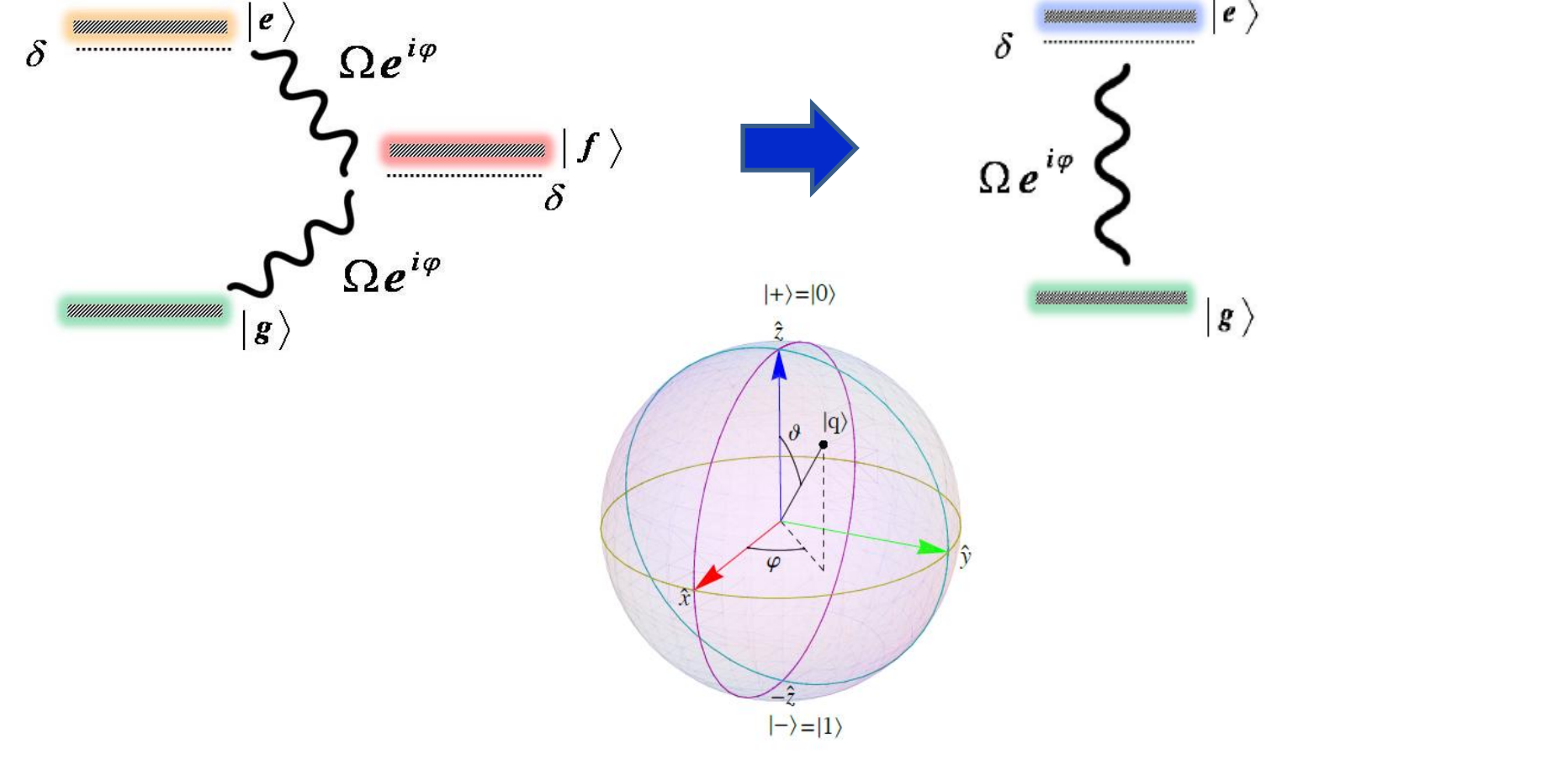


Tétraèdre de Pascal (3-simplex) pour classer les protocoles SU(3) identifier d'autres séquences plus robustes

### Nouvelles interférences quantiques de saveur SU(3)



Observation d'une brisure de symétrie SU(d) → SU(2)



Construction avec les matrices de Gell-Mann

$$\lambda_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \lambda_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \lambda_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \lambda_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \lambda_7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}, \lambda_8 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$$

Comprendre avec une autre perspective le travail publié par le passé pour améliorer les performances des horloges atomiques de nouvelle génération  
 → Nouveaux capteurs quantiques plus robustes contre la décohérence, les effets systématiques comme le déplacement lumineux et les fluctuations d'intensité laser...