

STAGE M1 PHYSIQUE S2 - 2019

ERCAN KÉVIN

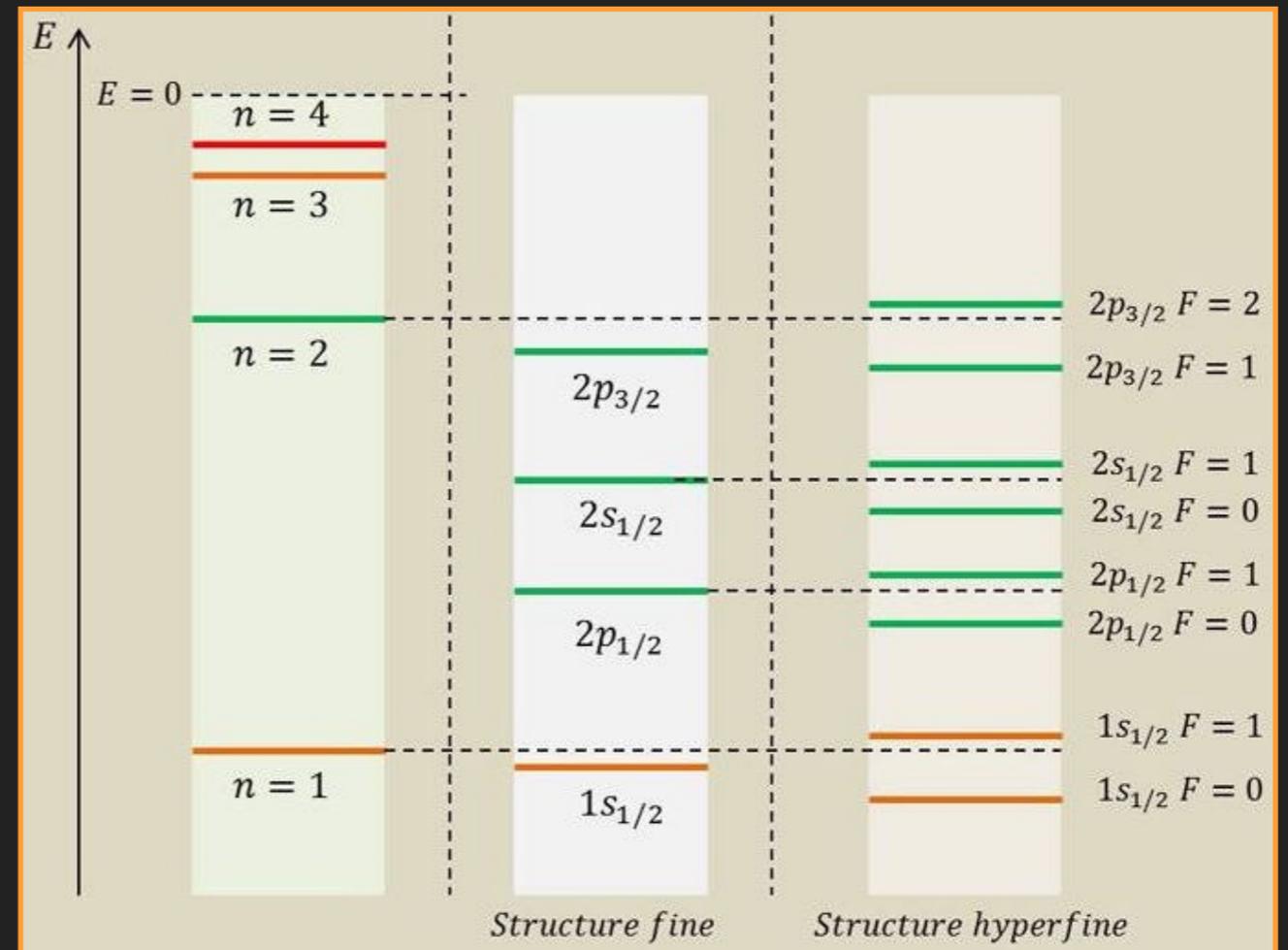
TUTEURS : MM. HERVIEUX (IPCMS-DON) ET MOLIQUÉ (IPHC-DRS)

ÉTUDE EXPLORATOIRE DES INTERRELATIONS ATOMIQUES ET NUCLÉAIRES

MOTIVATION : STRUCTURE ATOMIQUE HYPERFINE

- ▶ Noyau : responsable de l'orbite de l'électron
- ▶ Théorie des perturbations
- ▶ Levées de dégénérescence successives
- ▶ **I = spin nucléaire ET moment nucléaire total (approximation)**

Structure hyperfine de l'atome d'hydrogène



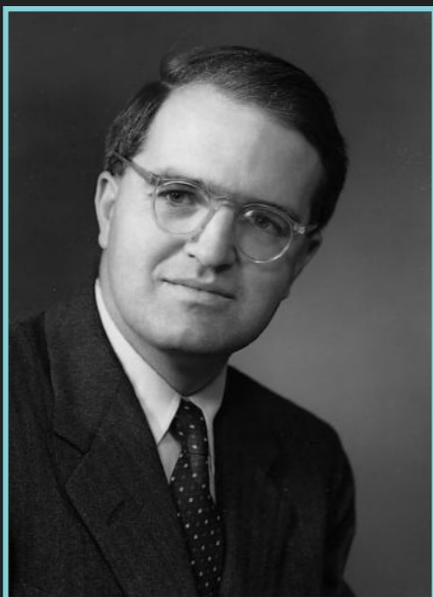
Couplage
spin(**S**)-orbite(**L**)

$$\mathbf{J} = \mathbf{S} + \mathbf{L}$$

Couplage noyau(**I**)-
électron(**J**)

$$\mathbf{F} = \mathbf{I} + \mathbf{J}$$

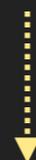
MAGNÉTISME NUCLÉAIRE



A. BOHR

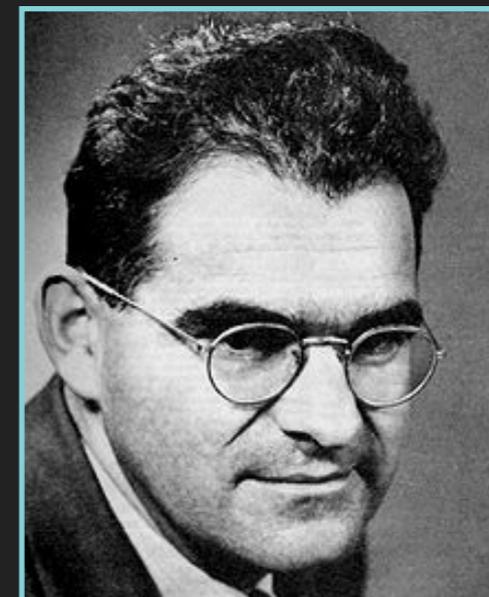
The Influence of Nuclear Structure on the Hyperfine Structure of Heavy Elements (1950)

MAGNETISME NUCLEAIRE **PONCTUEL**



TRANSITION

MAGNETISME NUCLEAIRE **DISTRIBUE**



V.F. WEISSKOPF

- ▶ Transition préalablement suggérée par **F. BITTER** (1949)
- ▶ Proton : densité de courant non-nulle → partie orbitale du noyau

SEPARATION DU MAGNETISME NUCLEAIRE

Magnétisme de spin + Magnétisme orbital

MODÈLE DE DÉPART

▶ Atome de Bismuth

A = 209

→ Modèle en couches cohérent
Noyau pair-impair : spin **I** non-nul

Z = 83

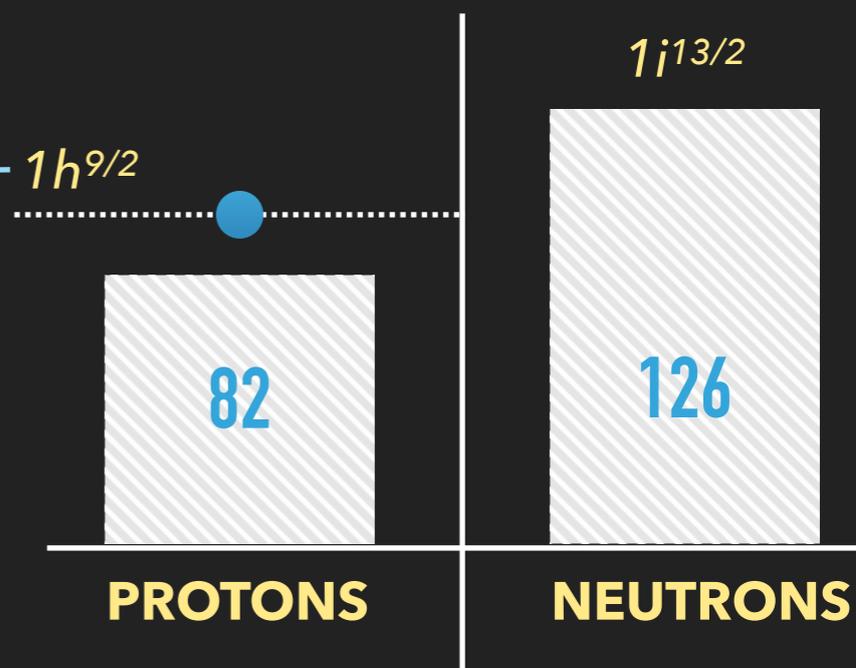
$$I = 9/2$$

N = 126

→ Relativité restreinte

Z : Forte charge nucléaire

→ Interaction coulombienne



Équivalent à : **Pb 208** + proton

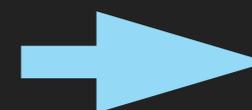
▶ Bismuth multichargé

CHARGE

→ **82 électrons en moins**

82+

→ Système réduit à **électron $1s^{1/2}$ + noyau**



Structure type
« **hydrogène** »

▶ Géométrie sphérique

HAMILTONIEN DU SYSTÈME

- ▶ Electron relativiste dans un champ électromagnétique

$$H = H_D + H_{int}$$

Hamiltonien de Dirac

$$c\boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{p} + mc^2\beta$$

$V(r)$: potentiel électrostatique nucléaire

$\mathbf{A}(r)$: potentiel vecteur nucléaire

(m, e, \mathbf{p}) : électron

$\boldsymbol{\alpha}, \beta$: matrices de Dirac

Hamiltonien d'interaction

$$c\boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{A}(r) - eV(r)$$

- ▶ Hamiltonien d'interaction (= hamiltonien hyperfin)

REFORMULATION :
TENSEURS SPHERIQUES



$$H_{int} = H_{hfs} =$$

$$\sum_k \mathbf{M}^{(k)} \cdot \mathbf{T}^{(k)}$$

$\mathbf{M}^{(k)}$ → Partie nucléaire de l'interaction

$\mathbf{T}^{(k)}$ → Partie électronique de l'interaction

ÉNERGIE HYPERFINE

- ▶ Développement perturbatif

1^{ER} ORDRE



$W_{hfs}(J) =$

$$\langle I J F M_F | \mathcal{H}_{hfs} | I J F M_F \rangle$$

États propres du couplage

$(I, J) \rightarrow F$

- ▶ Approximation dipolaire

Terme d'ordre
 $k = 1$

=

**CONTRIBUTION DU
DIPOLE MAGNETIQUE**

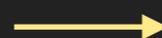
$W_{M1} =$

=

$$A \langle I J F | \mathbf{I} \cdot \mathbf{J} | I J F \rangle$$

- ▶ Coefficient de structure hyperfine d'ordre 1

Coefficient A



Traitement
mathématique et
numérique plus dense

CONSTANTE HYPERFINE : PARTIE ÉLECTRONIQUE

$$H\Psi = E\Psi$$

BISPNIER DE
DIRAC

+

$$\langle \Psi | \mathbf{T}_0^{(1)} | \Psi \rangle$$

TWE

$$\langle J || \mathbf{T}^{(1)} || J \rangle$$

PARTIE ANGULAIRE : déterminée
mathématiquement

PARTIE RADIALE : déterminée
numériquement

TENSEUR SPHERIQUE
ELECTRONIQUE

$$\mathbf{T}_0^{(1)} \propto -i \frac{\boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{Y}_0^{11}(\hat{\mathbf{r}})}{r^2}$$

CONSTANTE HYPERFINE : PARTIE NUCLÉAIRE

- ▶ Calcul direct : formule analytique

$$\mathbf{M}^{(1)} = \mu_N (g_L \mathbf{L} + g_S \mathbf{S}) \nabla (r Y_{11})$$



$$\langle I || \mathbf{M}^{(1)} || I \rangle$$

*L et S du nucléon
célibataire*

- ▶ Méthode numérique : estimation du moment nucléaire

**DISTRIBUTION
DU MOMENT
MAGNETIQUE**

$$\rho_m(r)$$

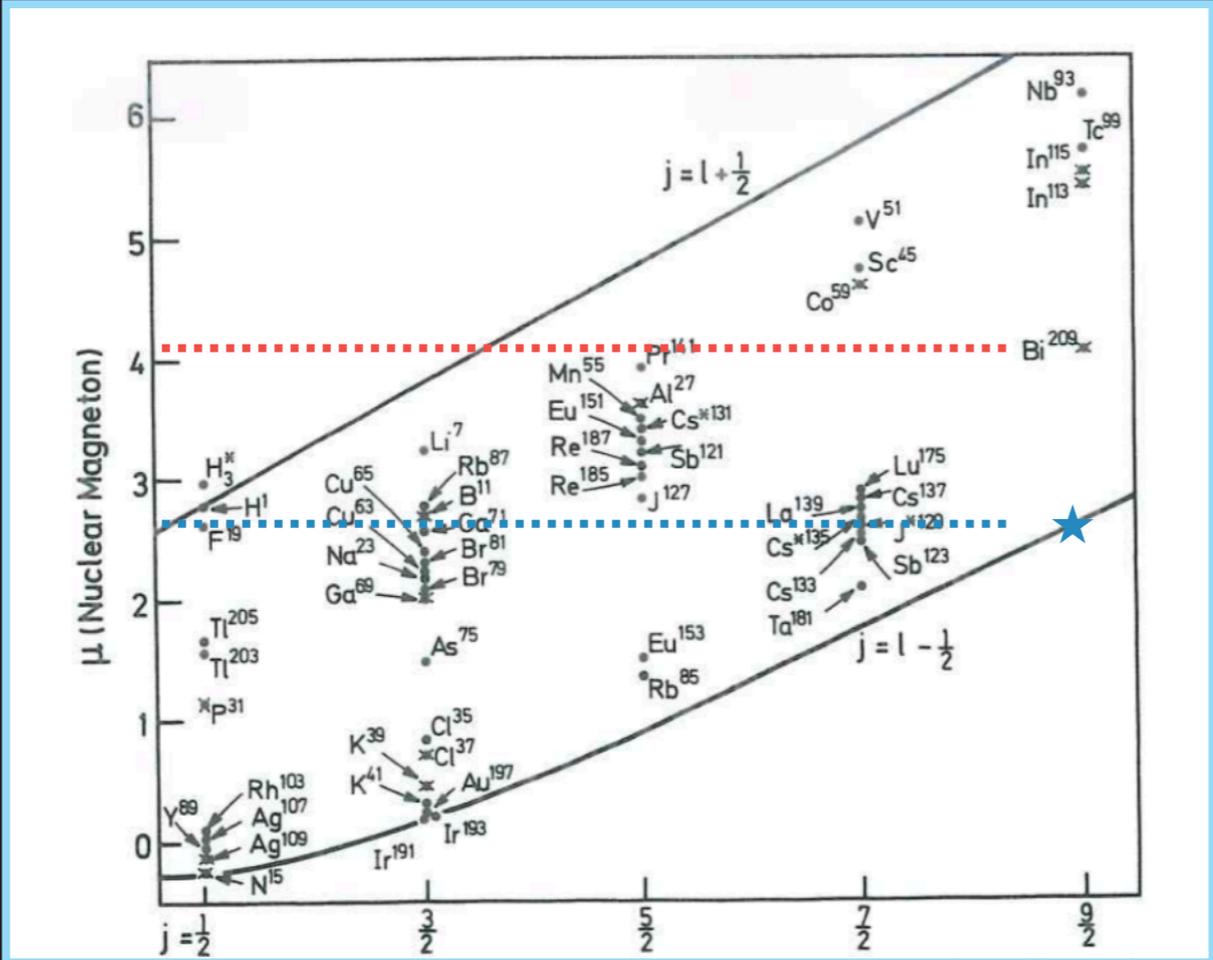


**MOMENT
MAGNETIQUE
NUCLEAIRE**

\propto

$$\langle I || \mathbf{M}^{(1)} || I \rangle$$

RÉSULTATS : MOMENT NUCLÉAIRE

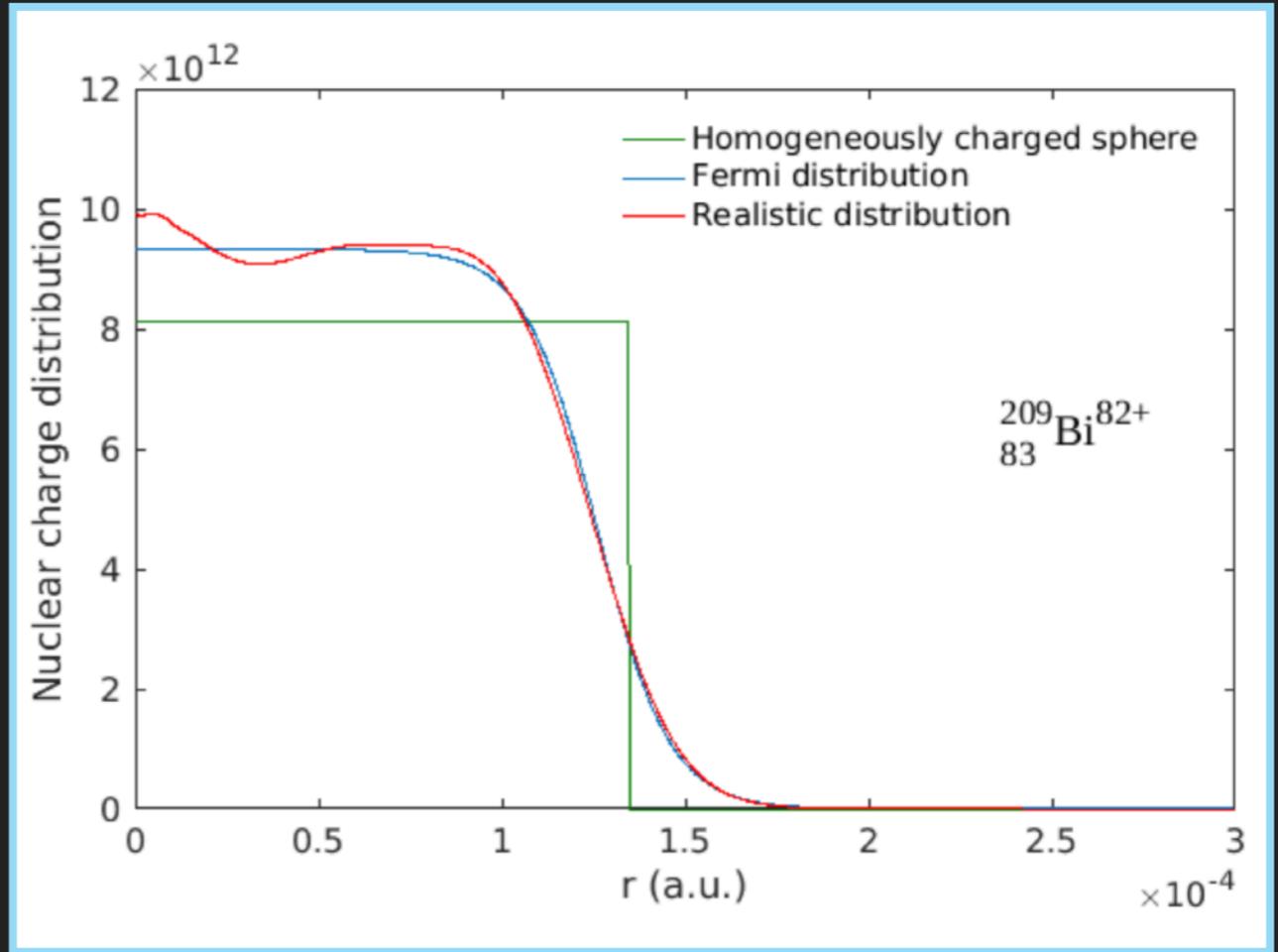


DEVIATIONS

Nuclear Many Body Problem,
Ring & Schuck (p.62)

$$\mu_I^{mes} \simeq 4.11\mu_N$$

$$\mu_I^{cal} \simeq 2.62\mu_N$$



CODE HARTREE-FOCK

CHEMINEMENT INVERSE

$$\rho_m(r) = \alpha_m \rho(r)$$

RÉSULTATS : CONSTANTE HYPERFINE

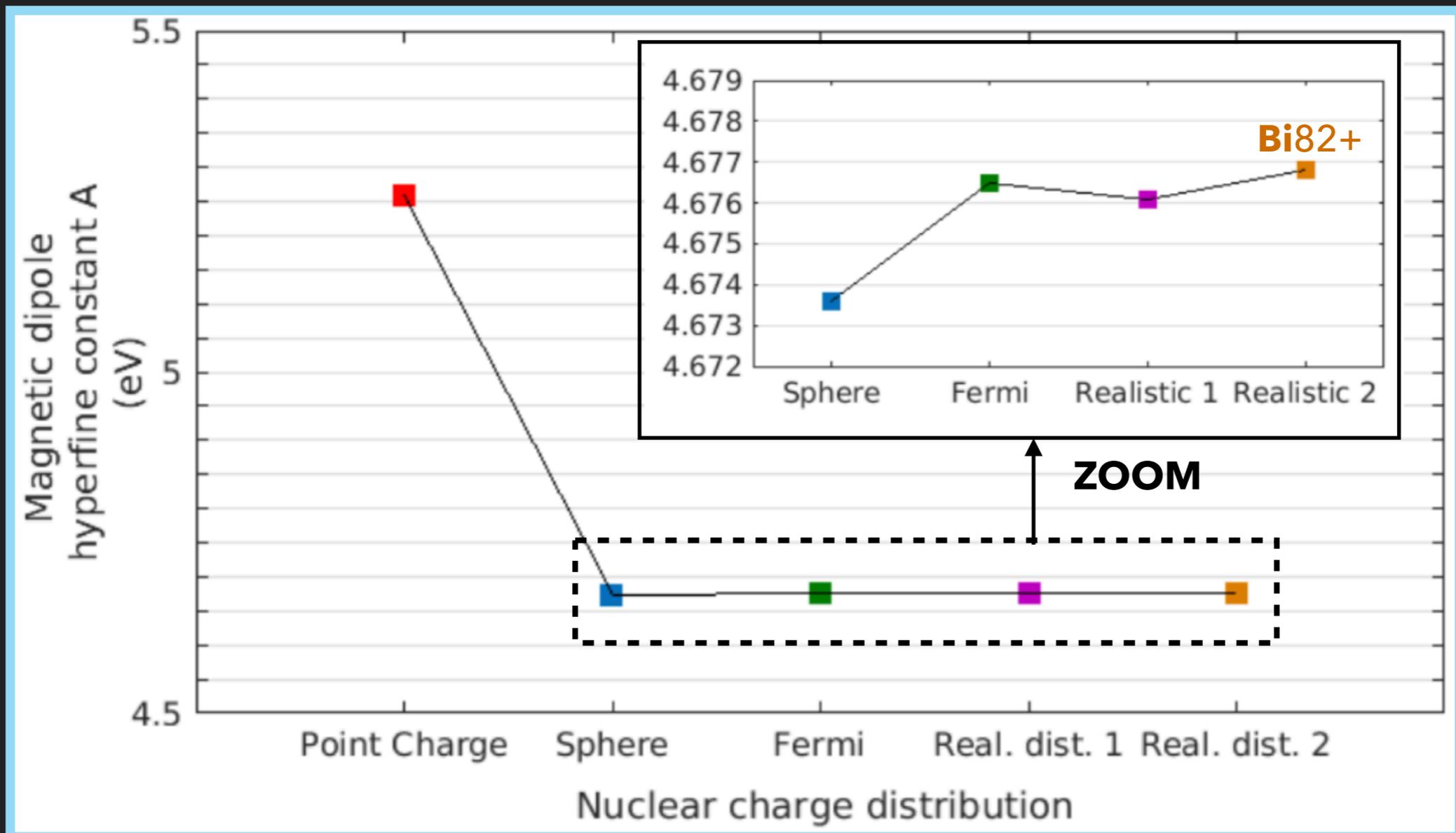
- Amplitude de la divergence *point-distribution*

$$A \propto$$

$$\langle J || \mathbf{T}^{(1)} || J \rangle$$

$$\times$$

$$\langle I || \mathbf{M}^{(1)} || I \rangle$$



CONCLUSIONS

- ▶ Distribution de charge \longleftrightarrow distribution de moment nucléaire
 - Equivalence menant à une confusion : neutrons non-chargés

- ▶ Approximation dipolaire & théorie des perturbations
 - Ignore les $2k$ -pôles suivants : couplages d'ordres supérieurs
 - Perturbation d'ordre 1 : estimer l'ordre 2