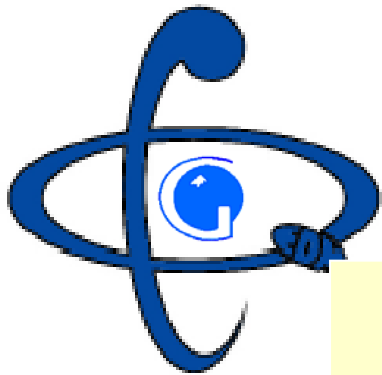


Electric dipole moment search in molecular beam of thorium monoxide



PNPI

QChem

Group:

Alexander N. Petrov

L.V. Skripnikov, and A.V. Titov

B.P. KONSTANTINOV PNPI,
ST.-PETERSBURG STATE UNIVERSITY,
ST.-PETERSBURG, RUSSIA

Tl-beam exp-t: $|d_e| < 1.6 \times 10^{-27} \text{ e}\cdot\text{cm}$

[B. Regan et al., *PRL* **88**, 071805 (2002)]

YbF-beam exp-t: $|d_e| < 1.05 \times 10^{-27} \text{ e}\cdot\text{cm}$

[J. Hudson et al., *Nature* **473**, 493
(2011)]

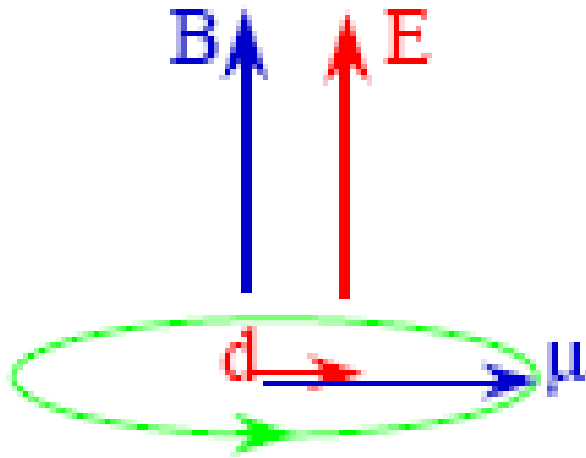
ThO-beam exp-t: $|d_e| < 8.7 \times 10^{-29} \text{ e}\cdot\text{cm}$

[*ACME Collaboration*, *Science* **1248213**

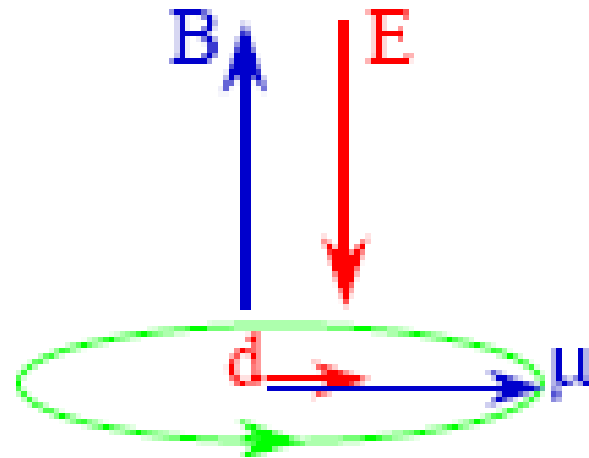
[DOI:10.1126/science.1248213],

arXiv:1310.7534]

Experimental detection of an EDM



$$\omega_1 = \frac{2\mu B + 2dE}{\hbar}$$



$$\omega_2 = \frac{2\mu B - 2dE}{\hbar}$$

$$\omega_1 - \omega_2 = \frac{4dE}{\hbar}$$

Sensitivity problem

Suppose $d_e = 8.7 \cdot 10^{-29} \text{ e} \cdot \text{cm}$ (current limit)

In a field 100 kv/cm $\omega \sim \text{nHz}$

The magnetic field problem

Suppose $d_e = 8.7 \cdot 10^{-29} \text{ e} \cdot \text{cm}$ (current limit)

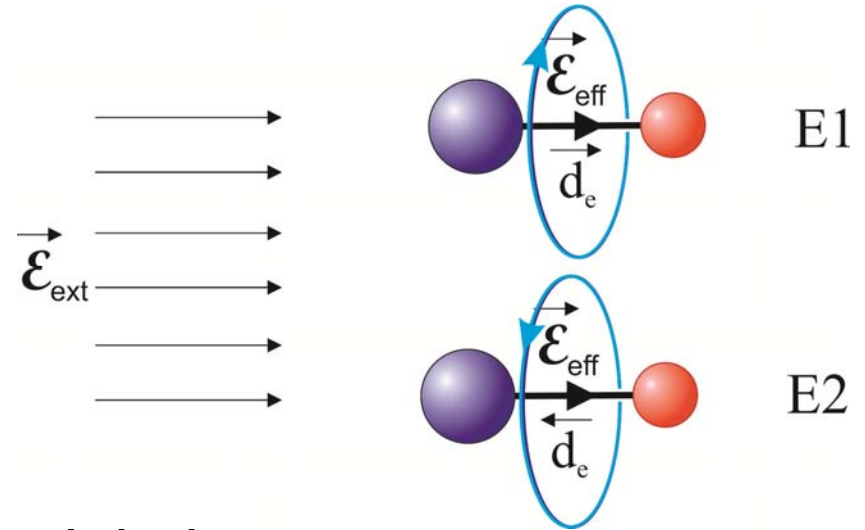
In a field 100 kv/cm $\omega \sim \text{nHz}$

When $\mu_B B$ equal this ? $B \sim \text{fG}$

Solution: Atoms and Molecules

Atoms: $\omega = 2Kd_e \cdot E$

Molecules: $\omega = 2P(E)d_e \cdot E_{\text{eff}}$
 $\rightarrow 2d_e \cdot E_{\text{eff}}$



YbF:

$E_{\text{eff}} = 22 \text{ GV/cm}$ [Skripnikov et. al. to be published]

ThO:

$E_{\text{eff}} = 84 \text{ GV/cm}$ [L. V. Skripnikov, A. N. Petrov, and A. V. Titov, JCP, **139**, 221103 (2013)]

Statistical sensitivity to EDM

N uncorrelated systems with coherence time τ

$$\delta\omega = \frac{1}{\tau\sqrt{N}}$$

$$\delta d_e = \frac{1}{2E_{eff}\tau\sqrt{N}}$$

Statistical sensitivity to EDM

ThO:

Photon counts/pulse: $N_0 = 8.2 \cdot 10^3$

Ablation laser repetition rate: $R = 10$ Hz

$$N = N_0 R T$$

$E_{\text{eff}} = 84$ GV/cm

Coherence time (time of flight): $\tau = 1.5$ ms

$$\delta d_e = 3 \cdot 10^{-29} e \cdot \text{cm} / \sqrt{D}$$

Statistical sensitivity to EDM

YbF new experiment

(Tarbut et. al. arXiv:1302.2870):

Laser cooling →

1/2 sec flight time (τ) instead of 1/2 ms

$$\delta d_e = 3 \cdot 10^{-31} e \cdot cm / \sqrt{D}$$

Systematic errors

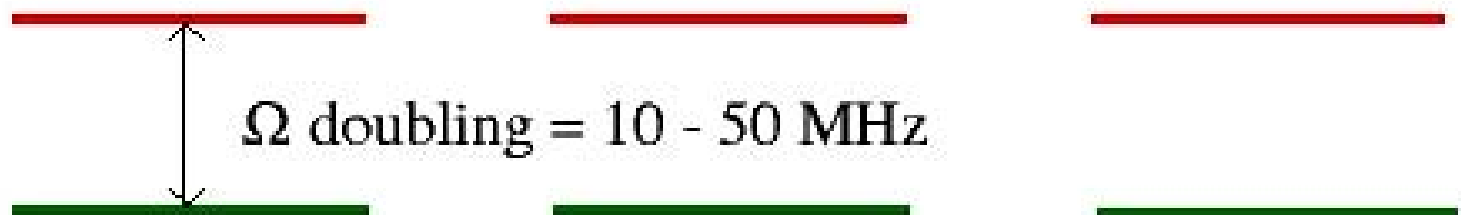
- Change of electric field magnitude on reversal
- Motional magnetic field
- Geometric phase
- etc

Ground rotational level $J=1$ for diatomics with $\Omega=1$



Ground rotational level $J=1$ for diatomics with $\Omega=1$

$$|e\rangle = |\Omega=1\rangle - |\Omega=-1\rangle, J=1^- \text{ (negative)}$$



$$|f\rangle = |\Omega=1\rangle + |\Omega=-1\rangle, J=1^+ \text{ (positive)}$$

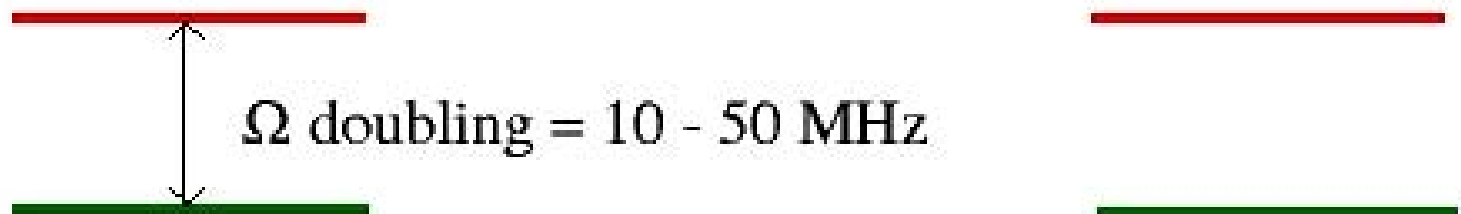
$M=-1$

$M=0$

$M=1$

Ground rotational level $J=1$ for diatomics with $\Omega=1$

$$|e\rangle = |\Omega=1\rangle - |\Omega=-1\rangle, J=1^- \text{ (negative)}$$



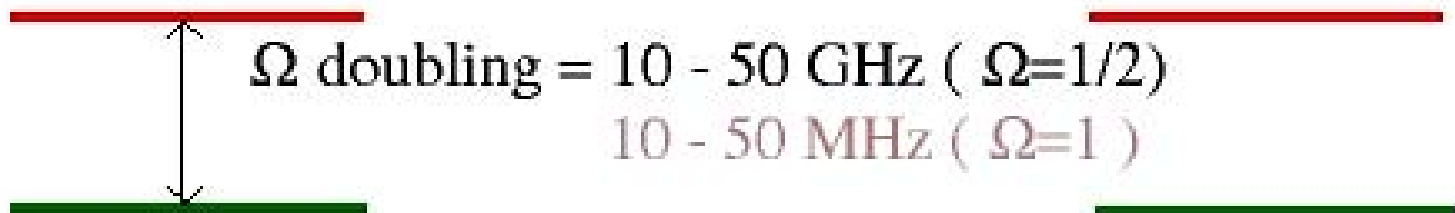
$$|f\rangle = |\Omega=1\rangle + |\Omega=-1\rangle, J=1^+ \text{ (positive)}$$

$M=-1$

$M=1$

Ground rotational level $J=1/2$ for diatomics with $\Omega=1/2$

$$|e\rangle = |\Omega=1/2\rangle - |\Omega=-1/2\rangle, J=1/2^- \text{ (negative)}$$

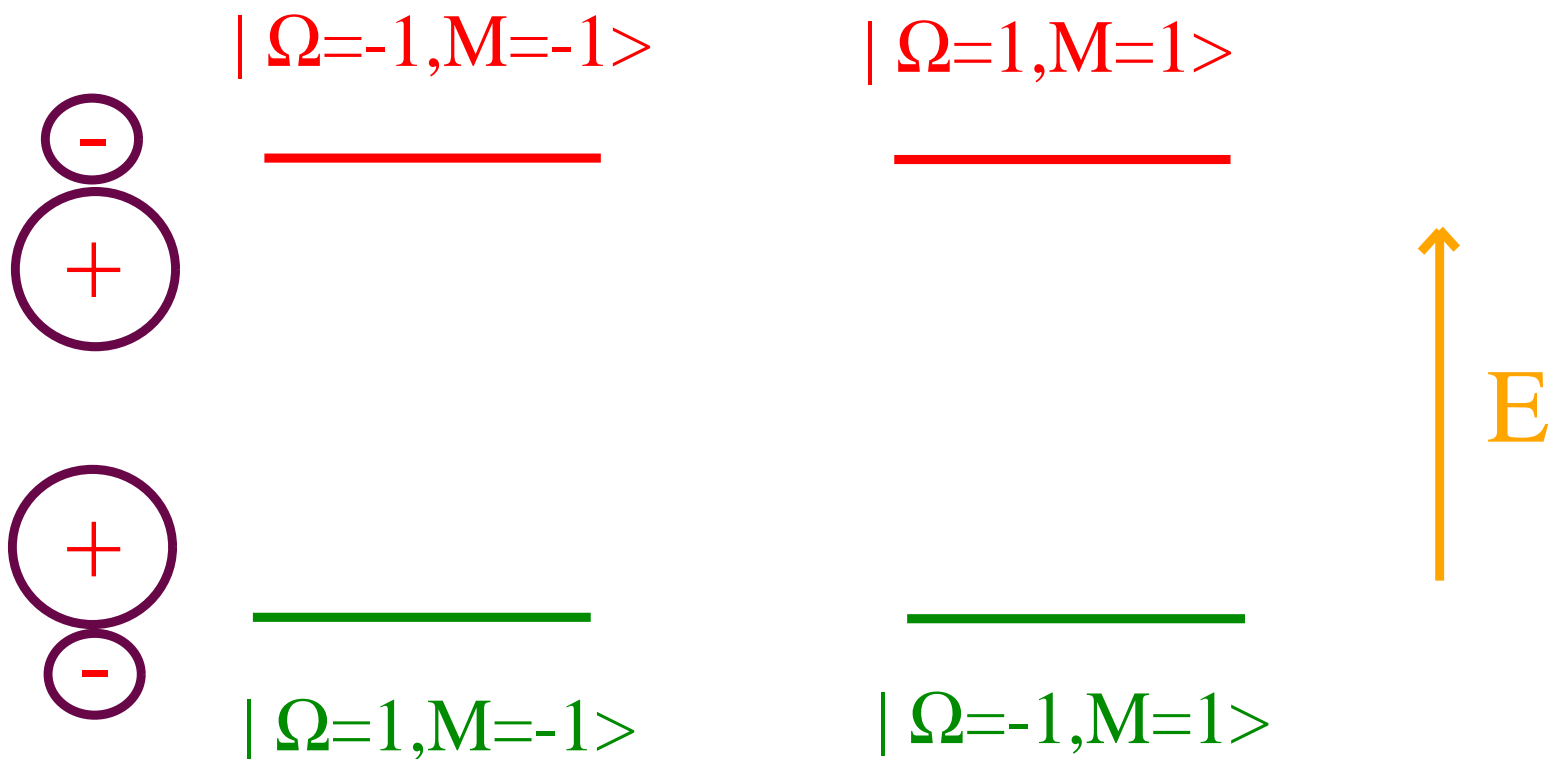


$$|f\rangle = |\Omega=1/2\rangle + |\Omega=-1/2\rangle, J=1/2^+ \text{ (positive)}$$

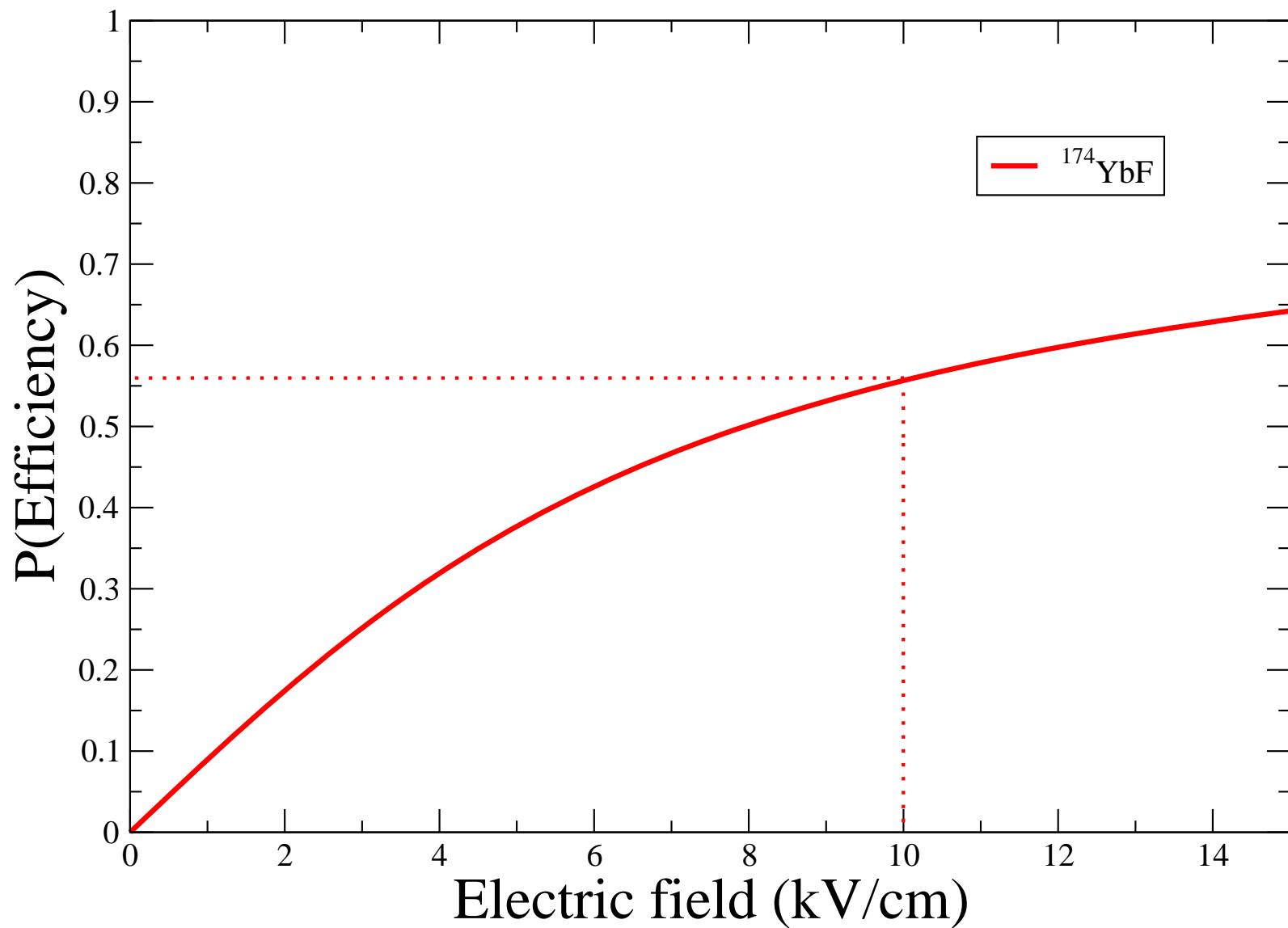
$$M=-1/2$$

$$M=1/2$$

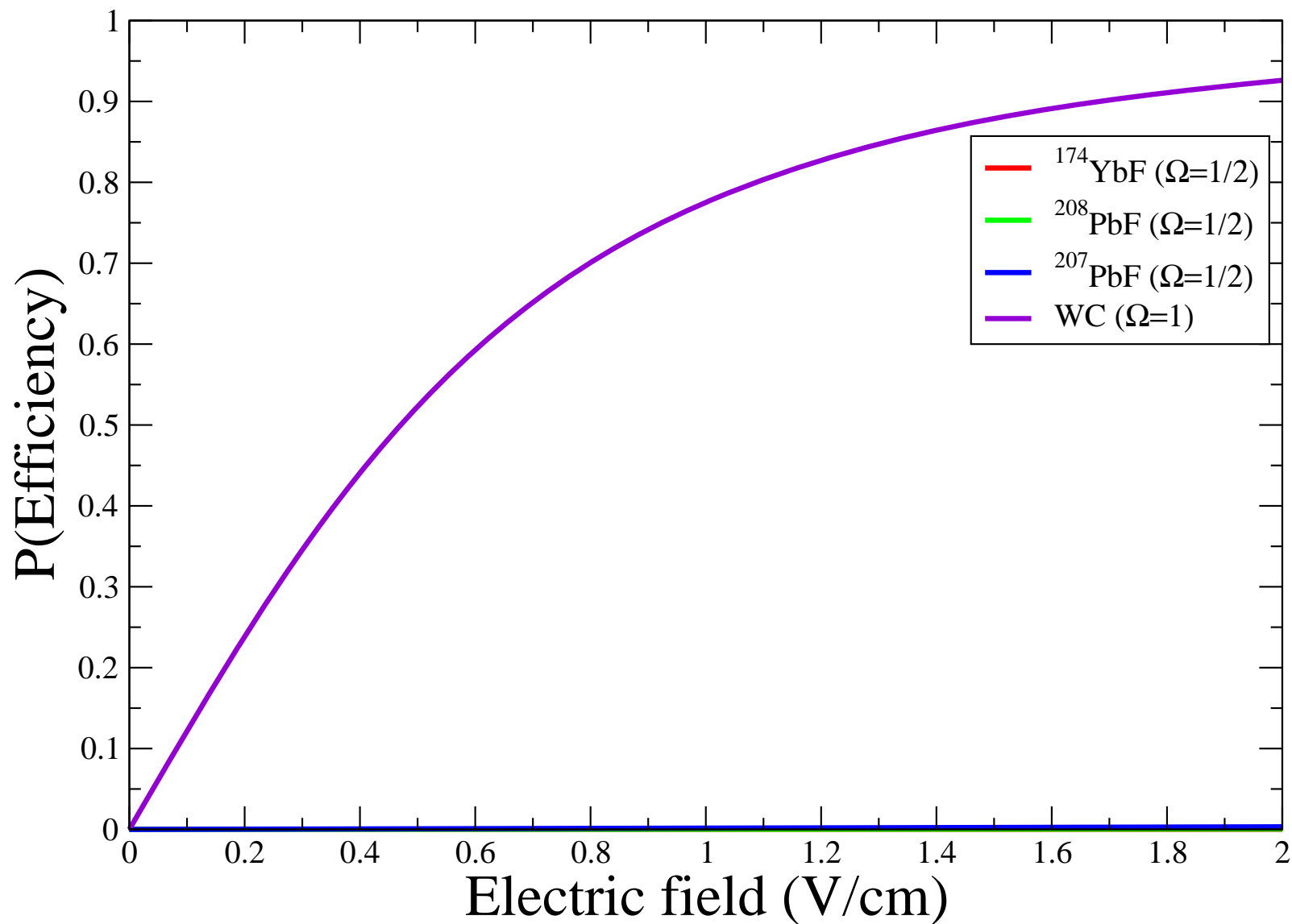
Ground rotational level $J=1$ for diatomics with $\Omega=1$
 in the presence of Electric field



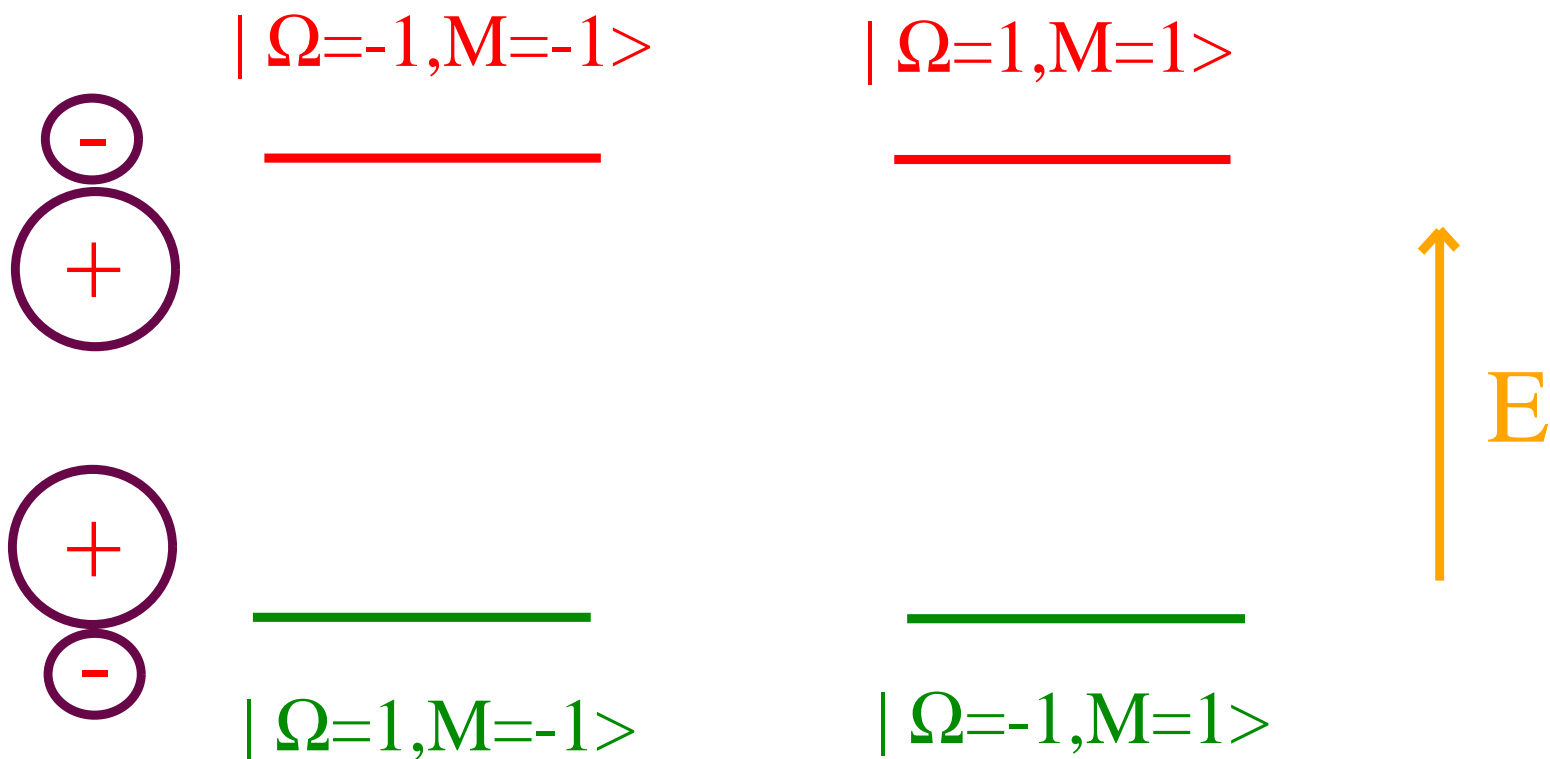
EDM shift in external electric field



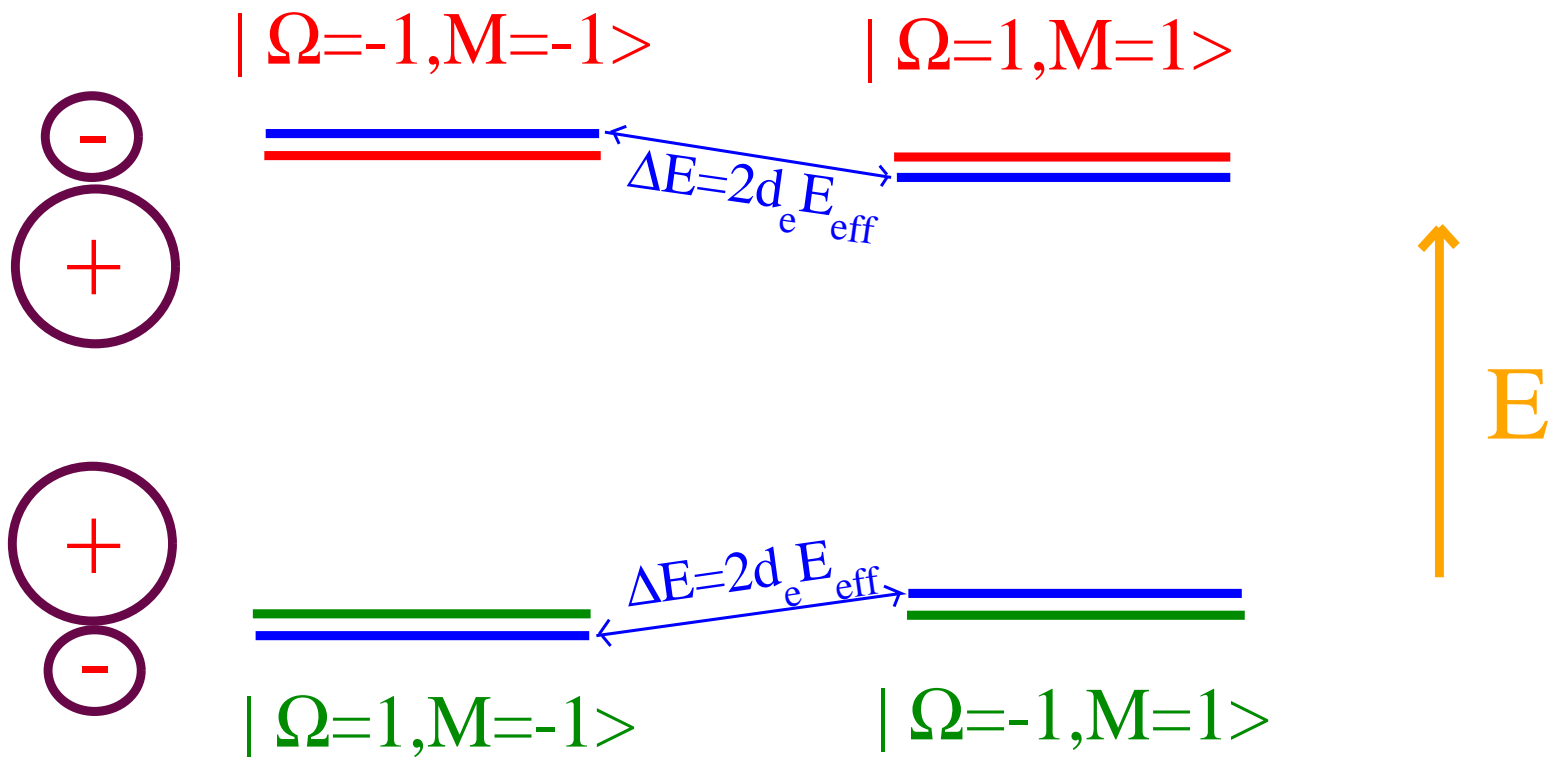
EDM shift in external electric field



Ground rotational level $J=1$ for diatomics with $\Omega=1$ in the presence of Electric field

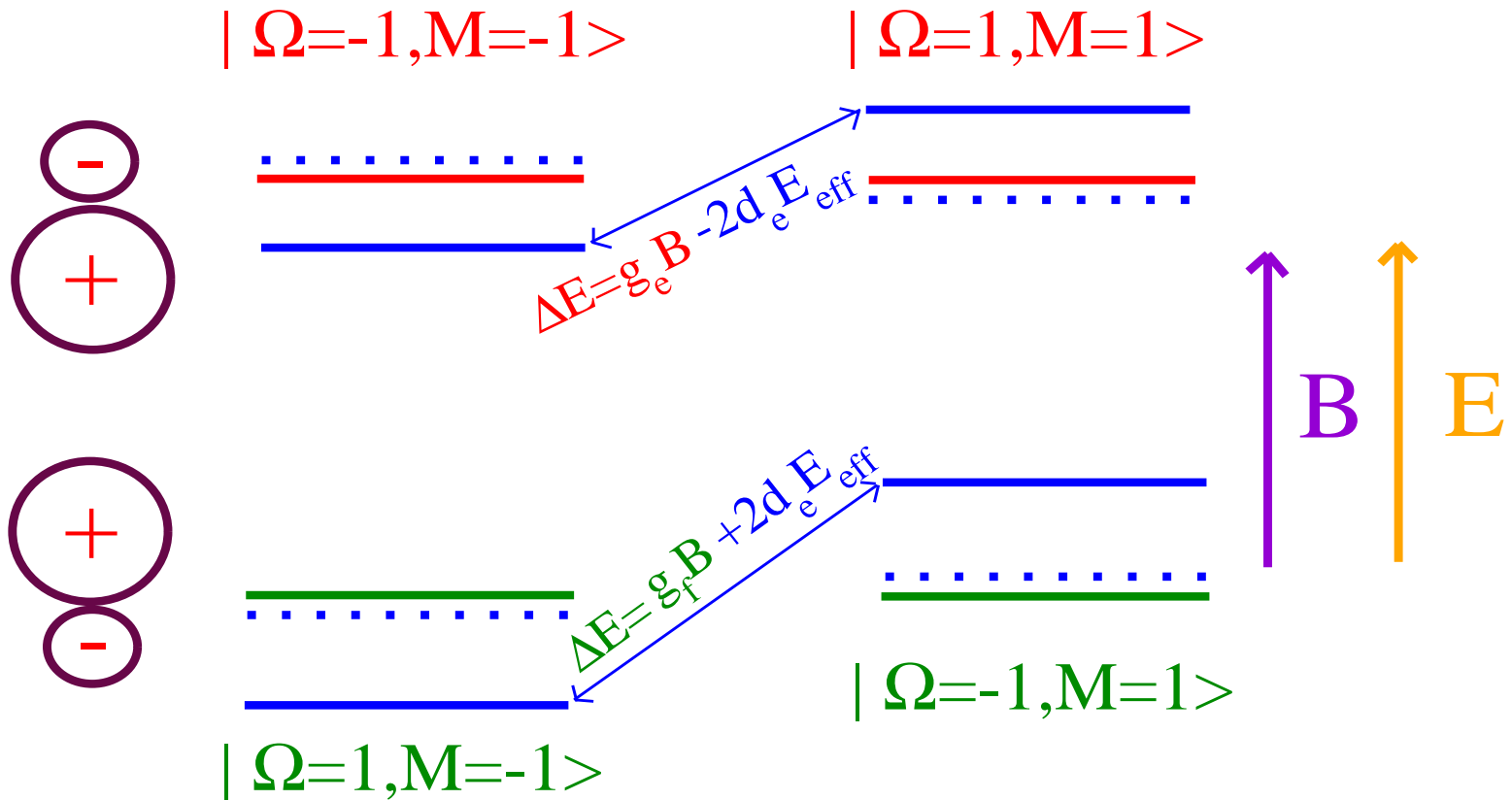


Ground rotational level $J=1$ for diatomics with $\Omega=1$
 in the presence of Electric field
 Blue lines are EDM shifts



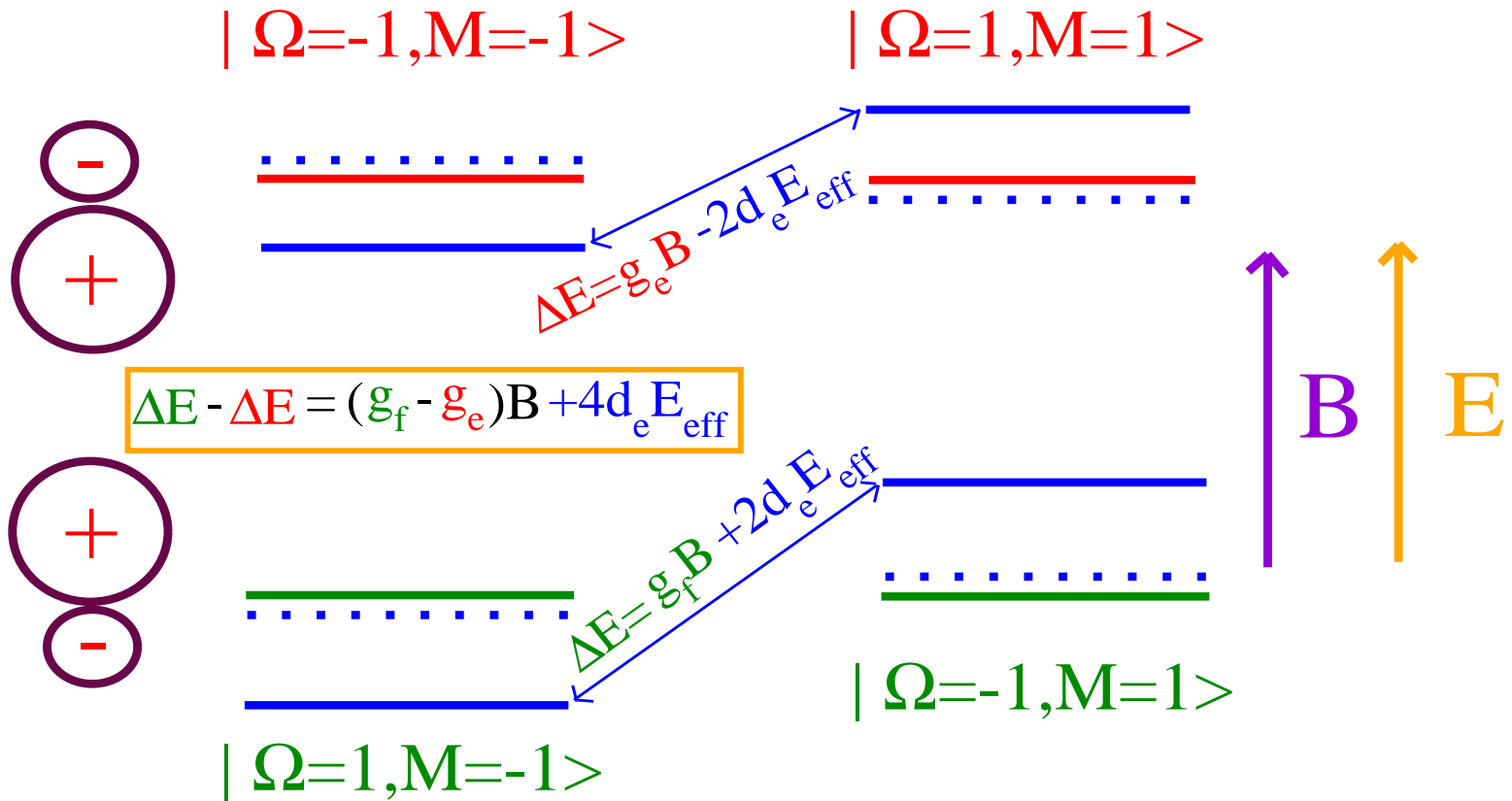
Ground rotational level $J=1$ for diatomics with $\Omega=1$ in the presence of Electric and Magnetic Fields

Blue lines are EDM and Zeeman shifts



Ground rotational level $J=1$ for diatomics with $\Omega=1$ in the presence of Electric and Magnetic Fields

Blue lines are EDM and Zeeman shifts



g factors for ThO (in units 10^{-3})

Calculation					Exper. (ACME)
J	g	g_e	g_f	g	g
1	-4.144	-4.409	-4.391	-4.400	-4.40(5)
2	-1.381	-2.628	-2.609	-2.618	-2.7(1)
3	-0.691	-2.182	-2.164	-2.173	-2.4(2)

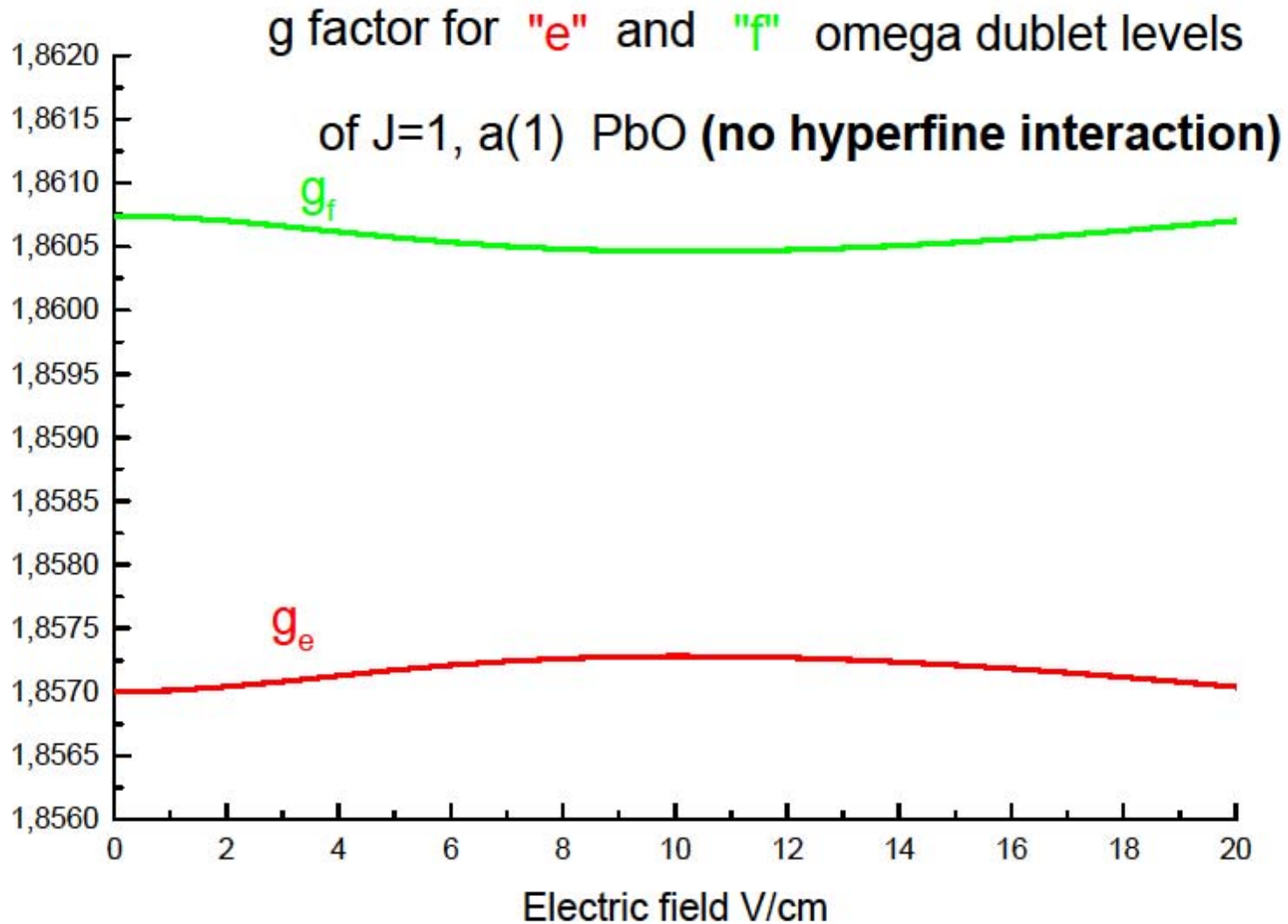
Difference between g factors for “e” and “f” levels of J=1 a(1) PbO

Experiment:

$$g_f - g_e = 0.0030(8) \quad [\text{D. Kawall, F. Bay, S. Bickman, Y. Jiang, and D. DeMille PRL } \mathbf{92}, 133007 (2004)]$$

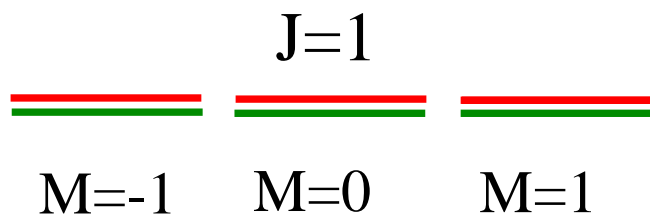
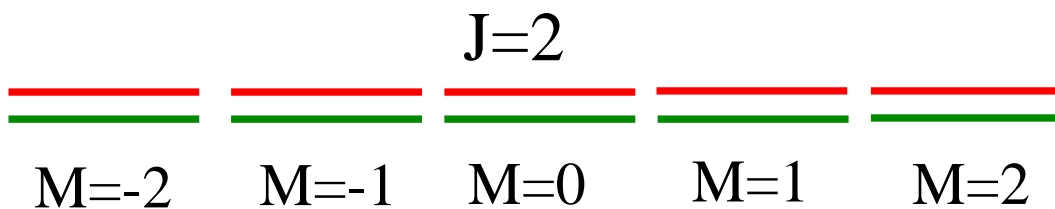
Calculation :

$$g_f - g_e = 0.0037 \quad [\text{A.N. Petrov, PRA } \mathbf{83}, 024502 (2011)]$$

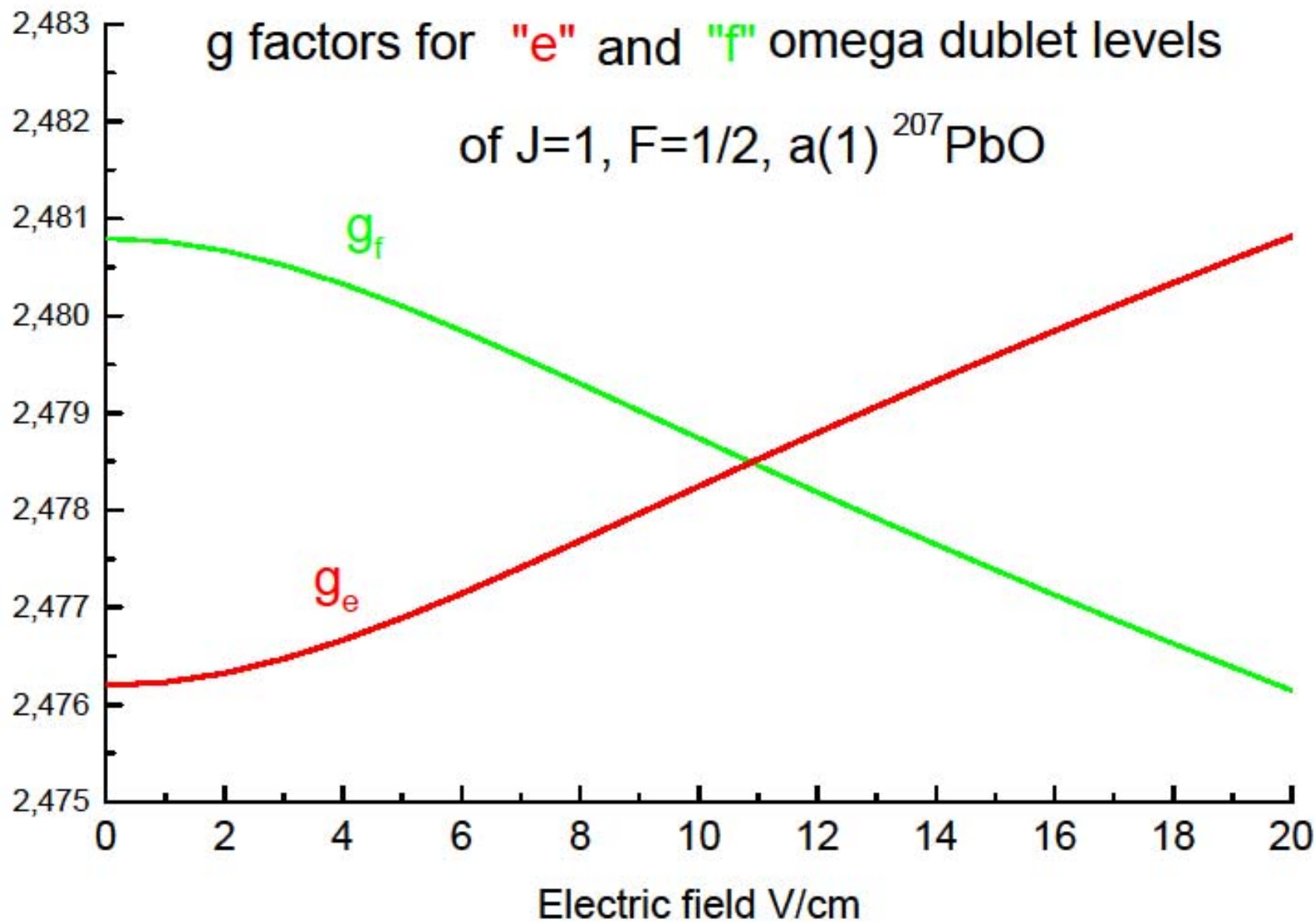


D. Kawall, F. Bay, S. Bickman, Y. Jiang, and D. DeMille, PRL **92**, 133007 (2004)
S. Bickman, P. Hamilton, Y. Jiang, and D. DeMille PRA **80**, 023418 (2009)

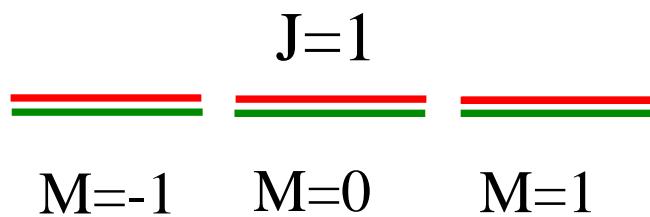
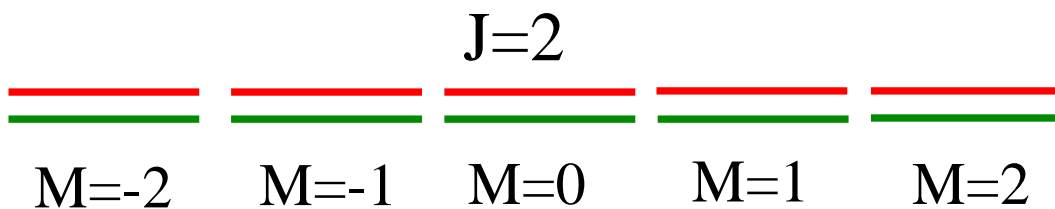
Rotational levels for diatomics with $\Omega=1$



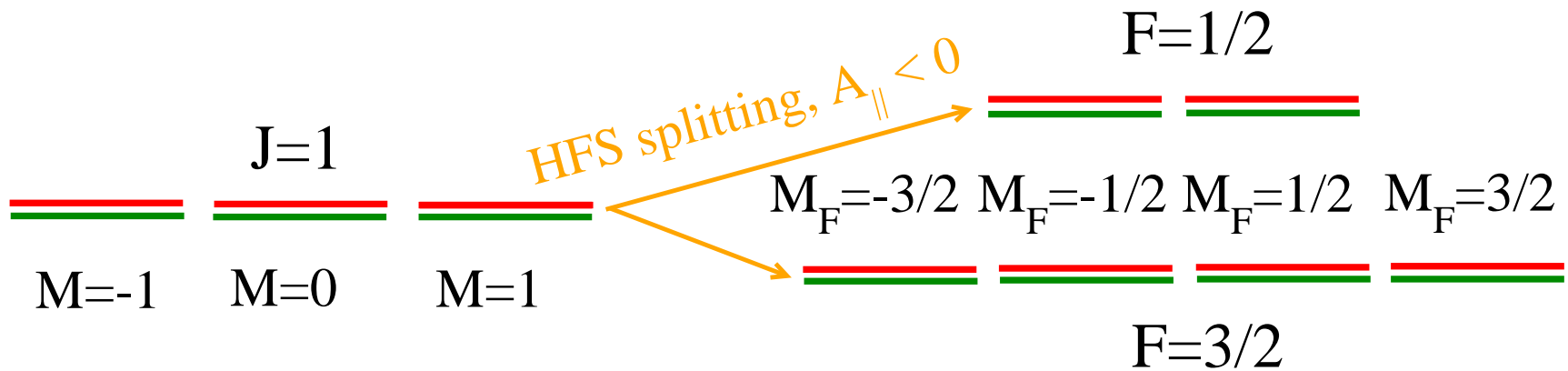
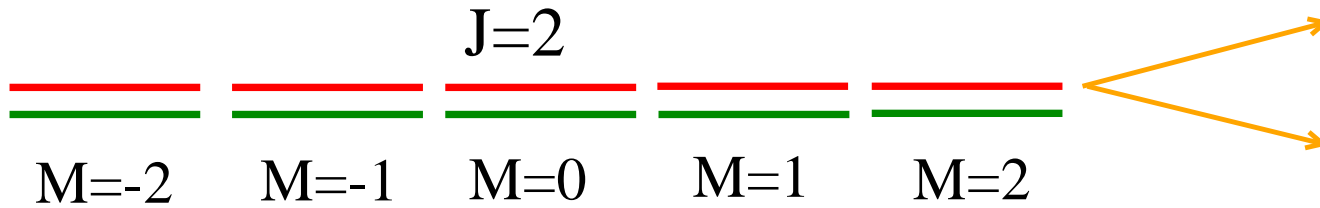
g factors for "e" and "f" omega doublet levels
of $J=1, F=1/2, a(1) {}^{207}\text{PbO}$

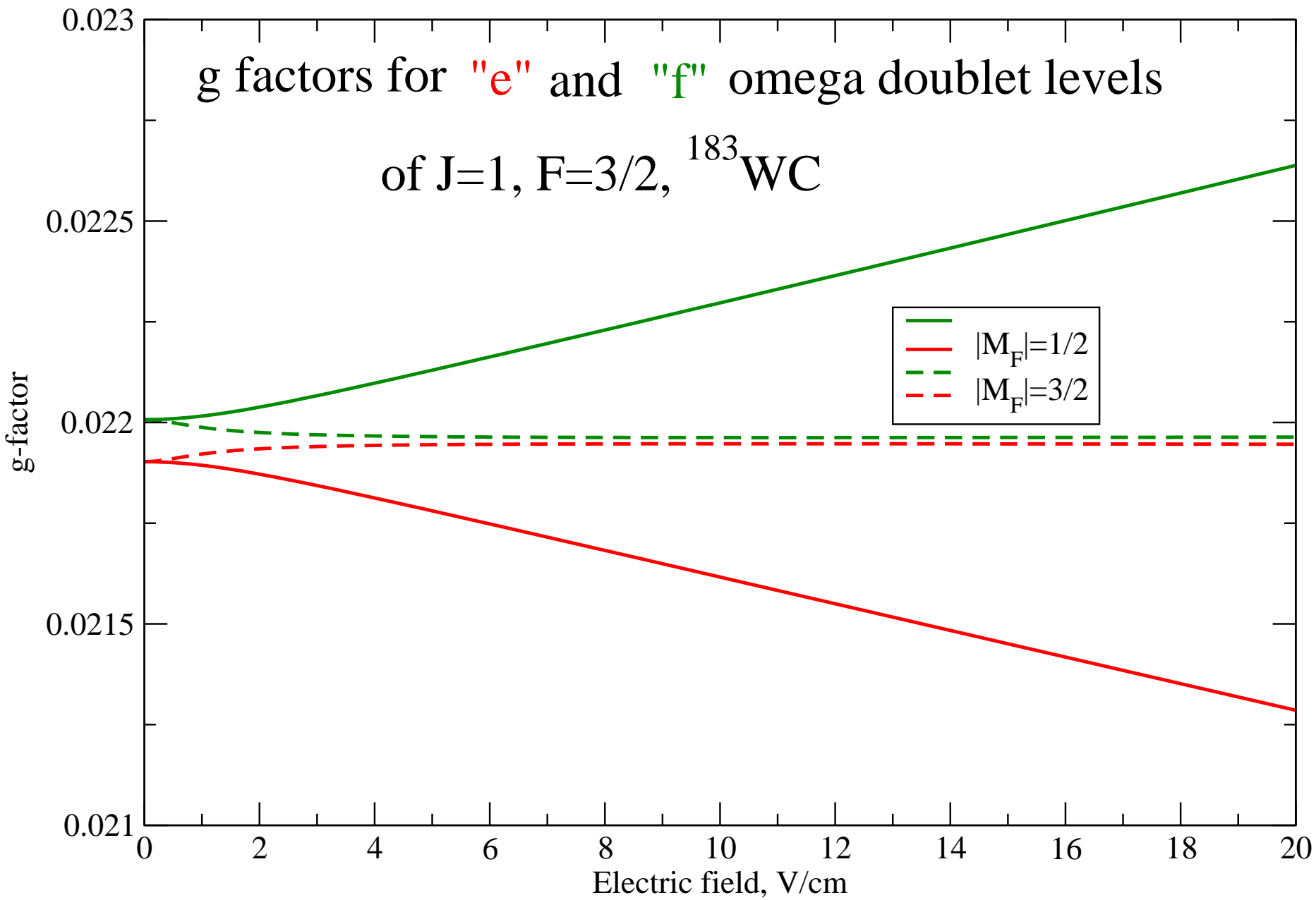


Rotational levels for diatomics with $\Omega=1$

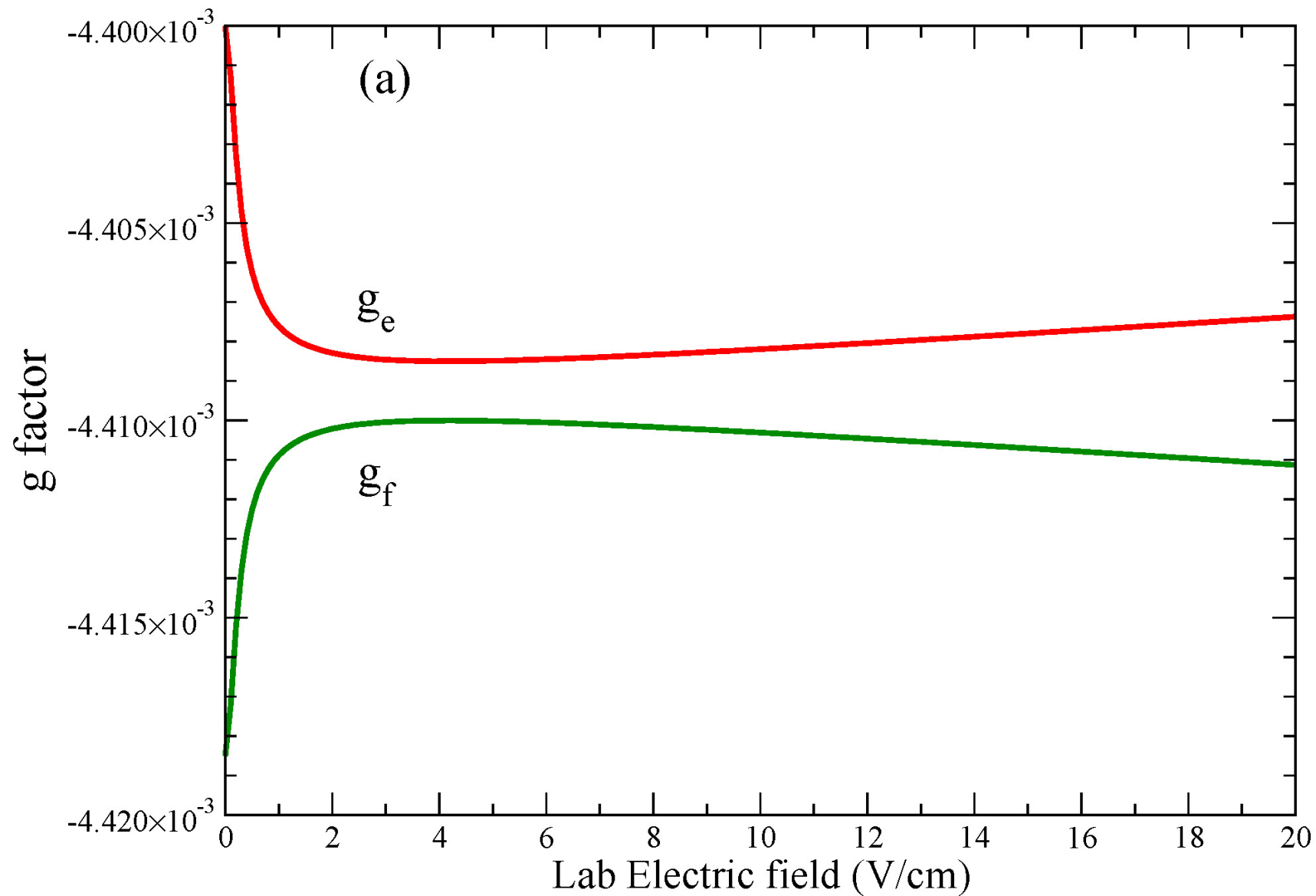


Rotational levels for diatomics with $\Omega=1$

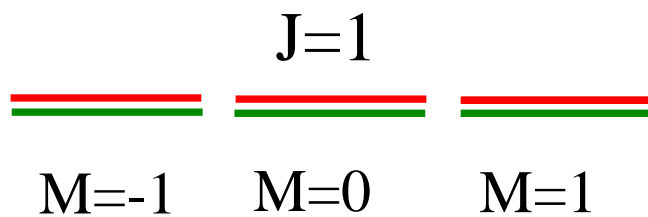
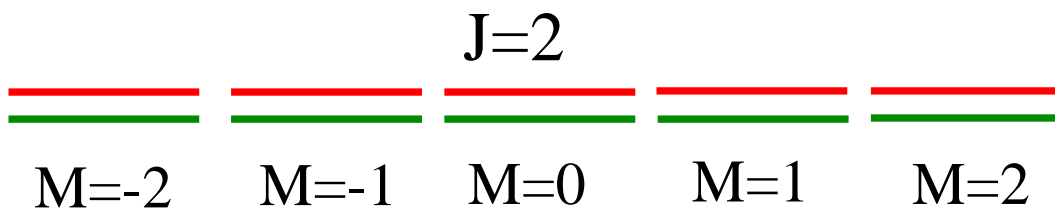




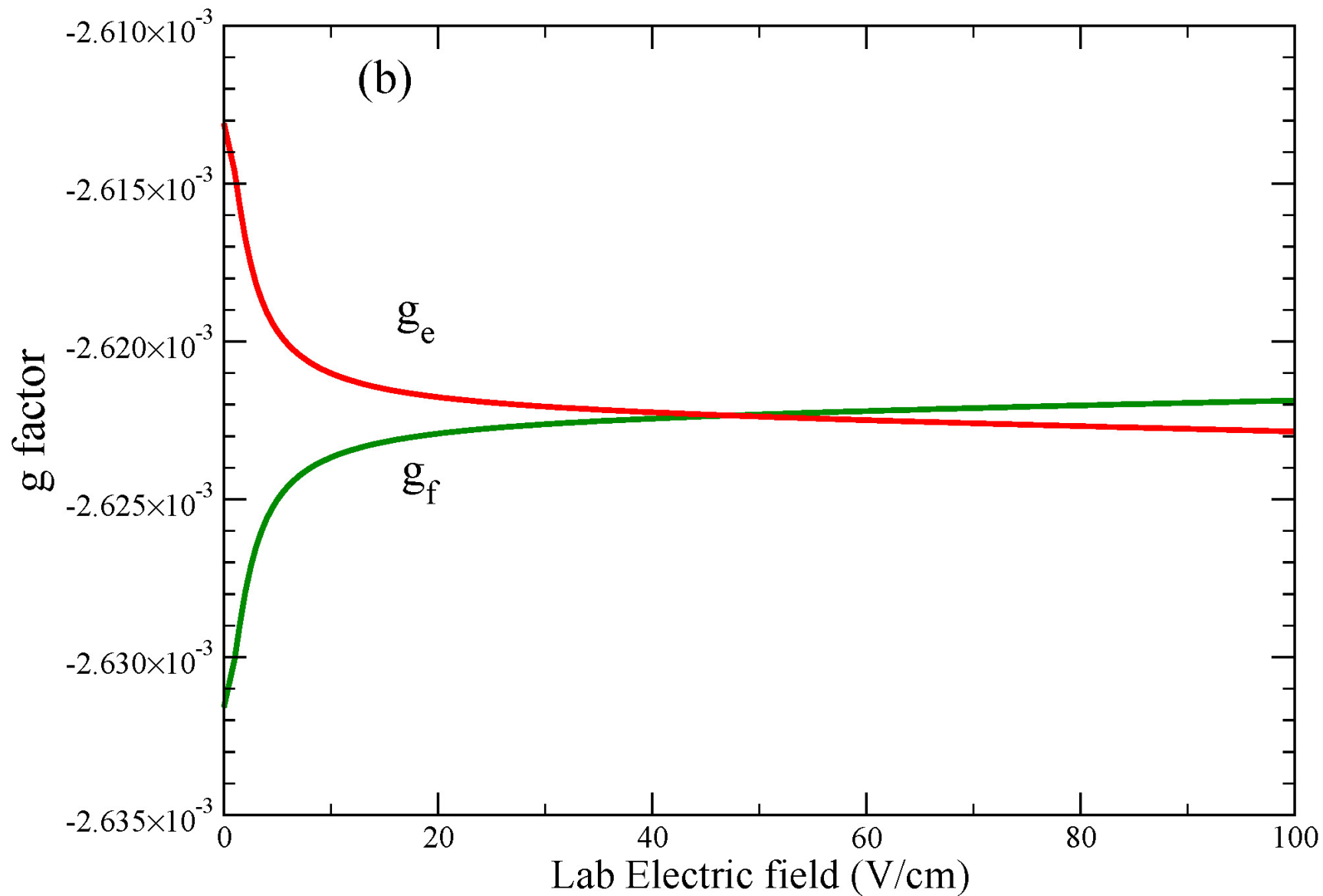
ThO $^3\Delta_1, J=1$



Rotational levels for diatomics with $\Omega=1$



ThO $^3\Delta_1$, $J=2$, $|M_J|=1$



Difference between g factors for ThO in external electric field

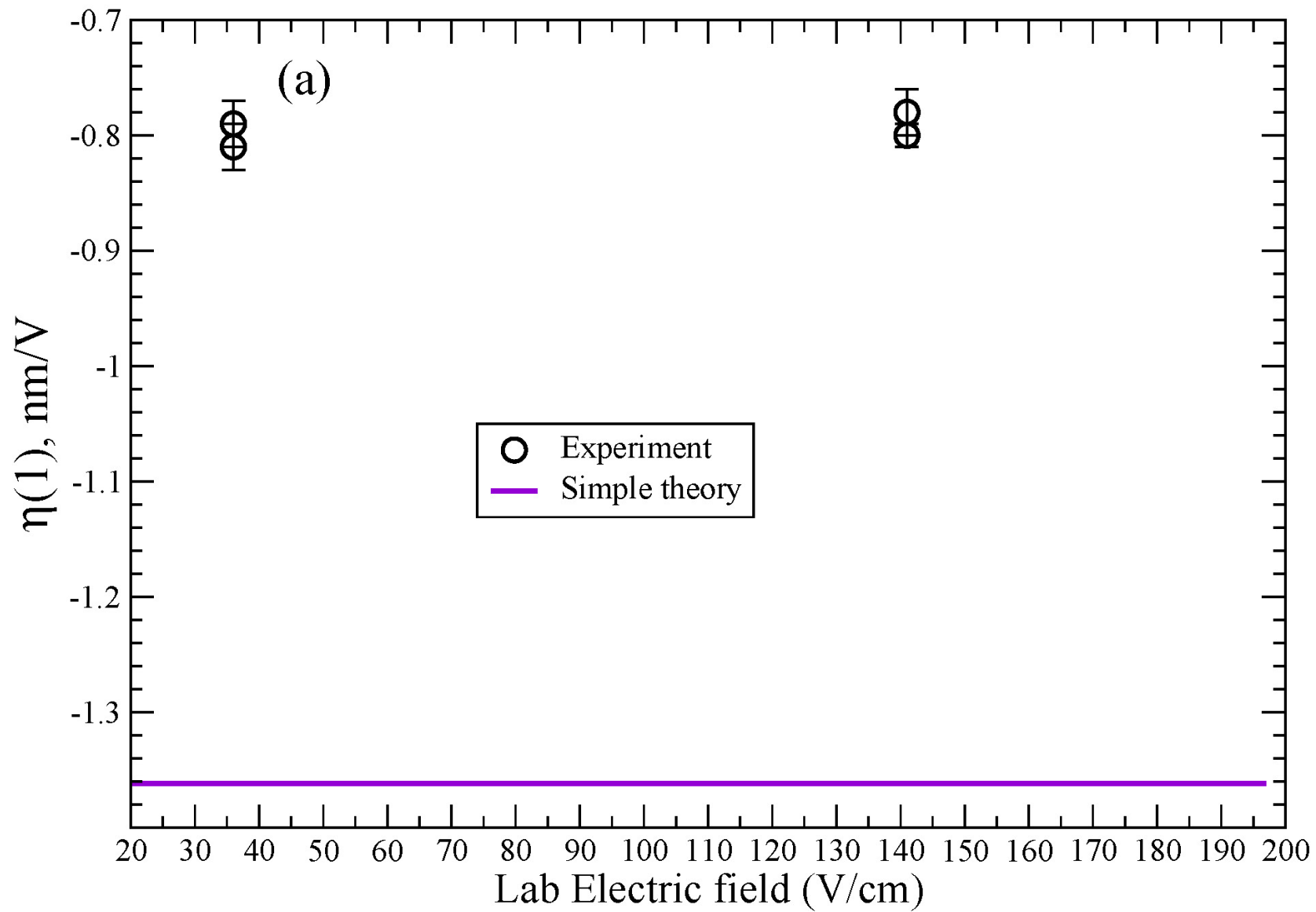
Ω -doublet spacing ~ 1 MHz

Rotational energy ~ 40 GHz

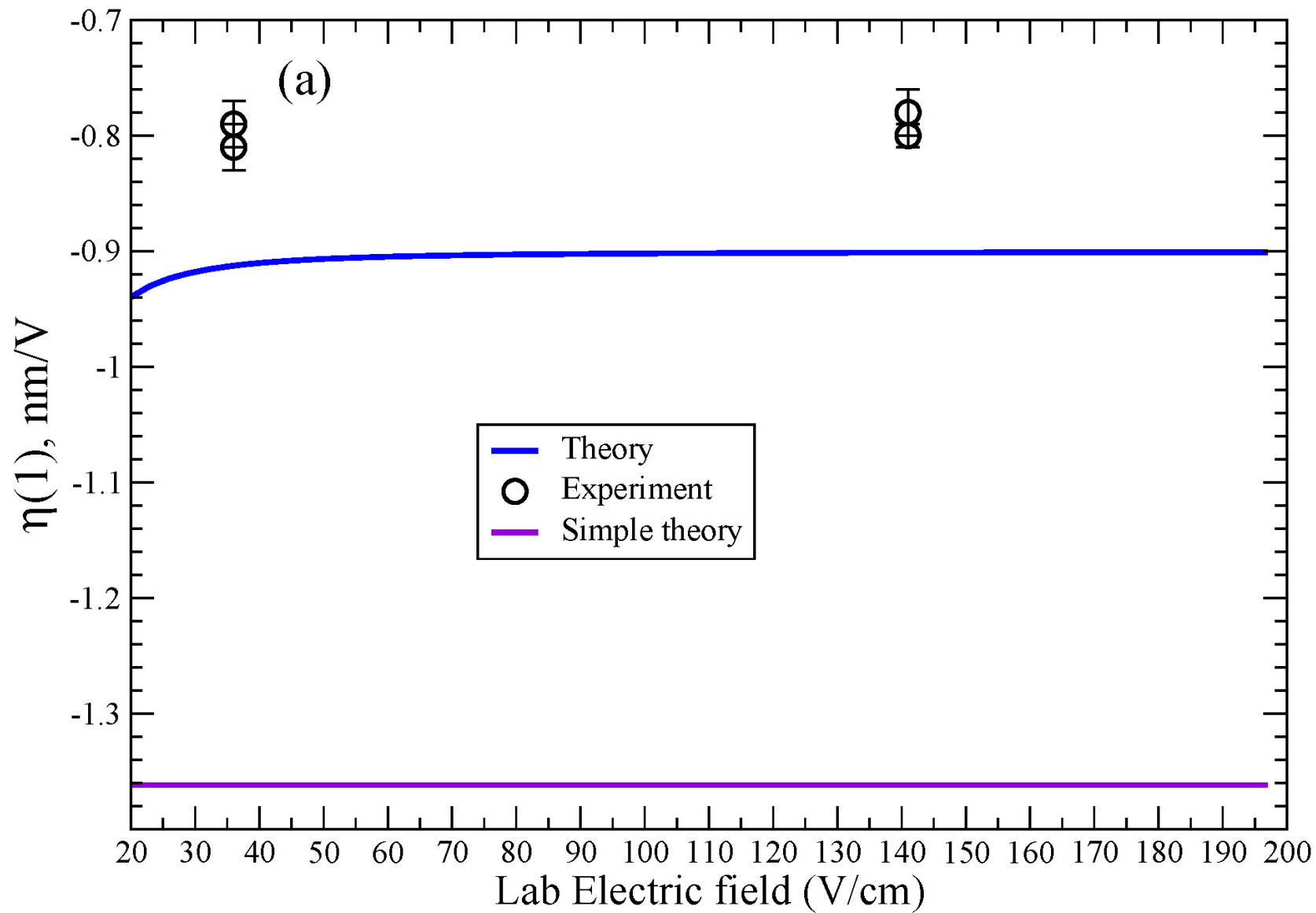
Electronic Energy ~ 25 THz

$$\Delta g(J) = \eta(J)|E|$$

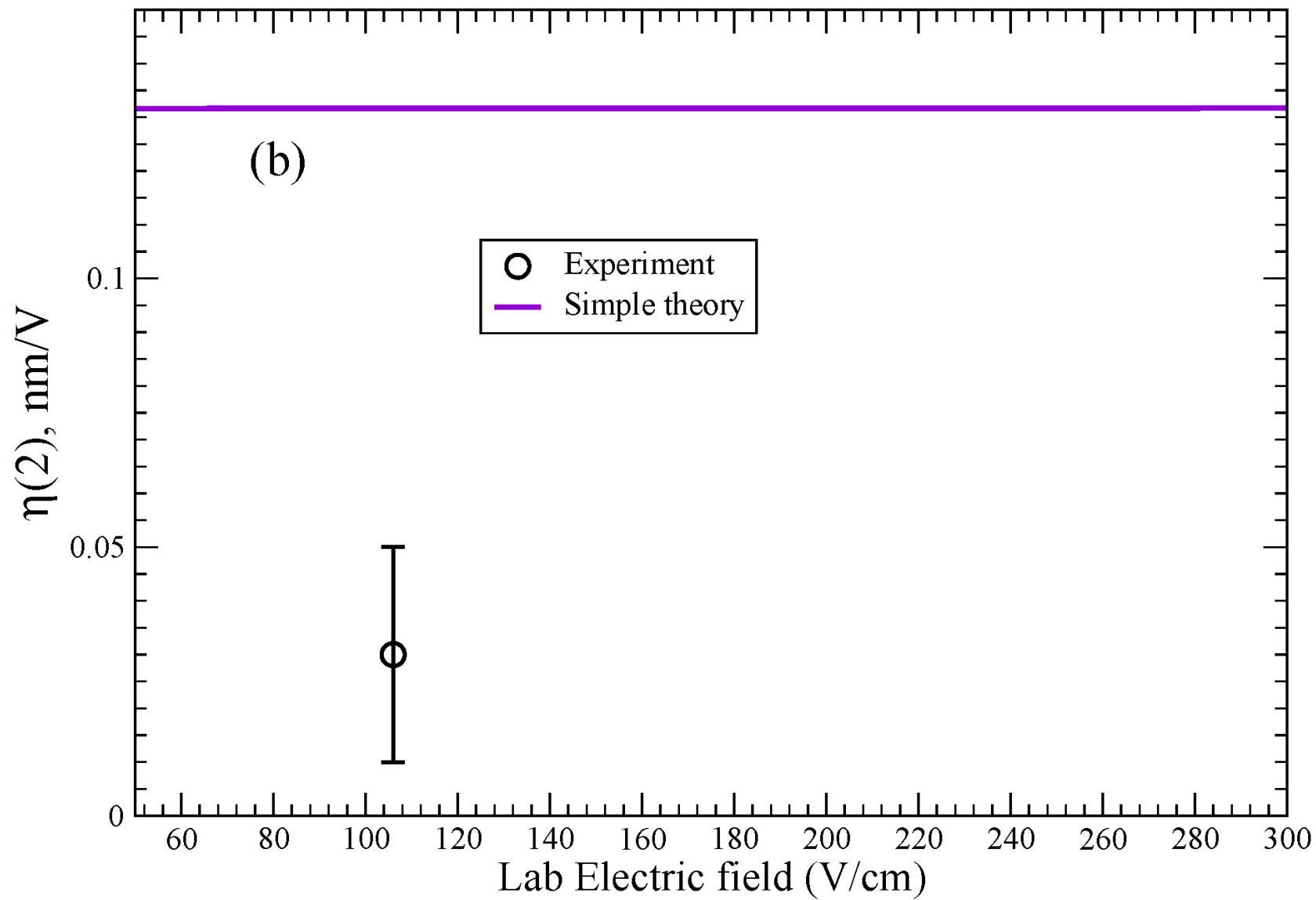
ThO $^3\Delta_1, J=1$



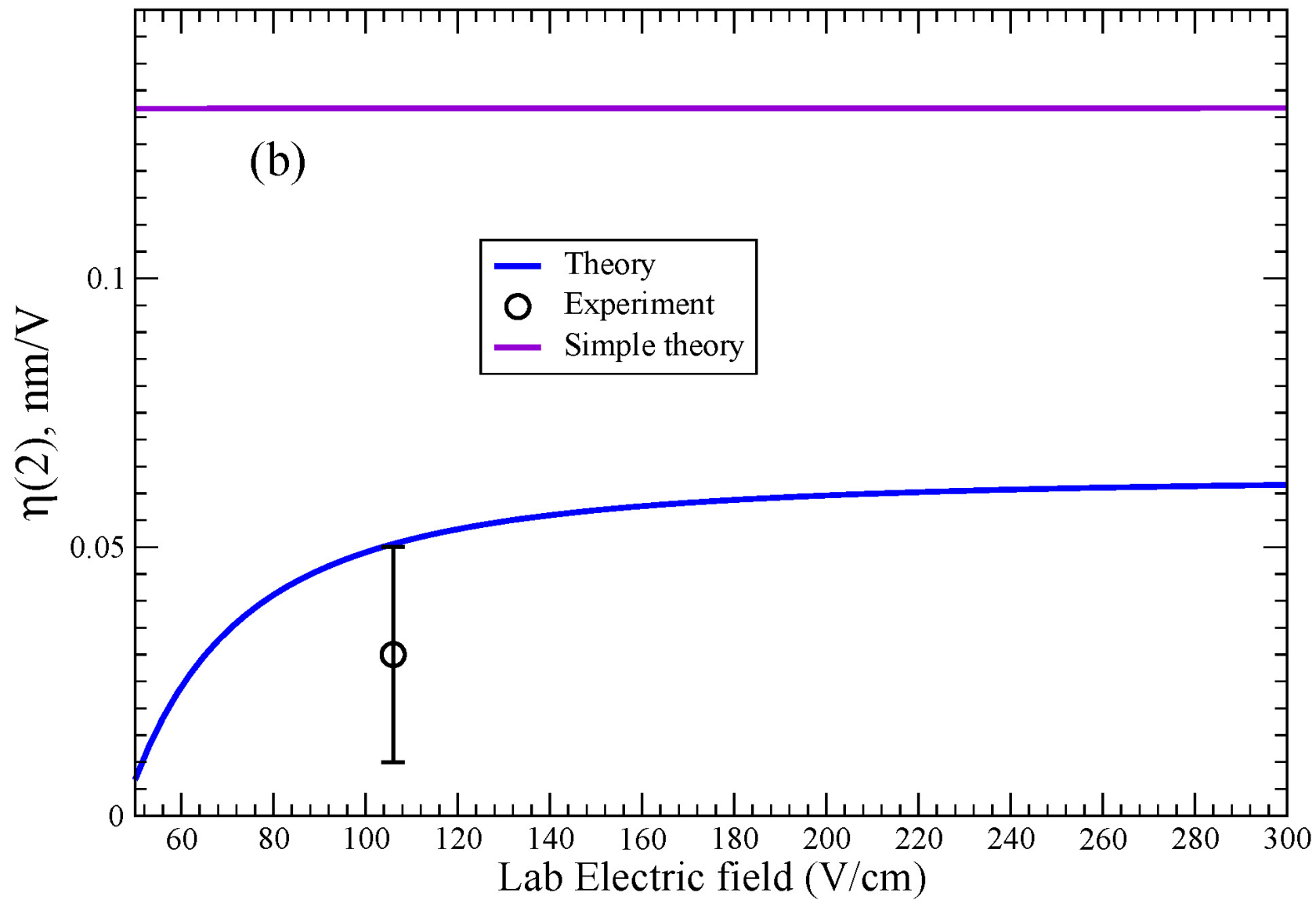
ThO $^3\Delta_1, J=1$



ThO $^3\Delta_1, J=2, |M_J|=1$



ThO $^3\Delta_1, J=2, |M_J|=1$



Заключение

Для поиска электрического дипольного момента электрона (ЭДМ) полярные молекулы имеют ряд преимуществ по сравнению с атомами включая большее электрическое поле (E_{eff}) действующее на ЭДМ и возможность устранять важные систематические эффекты. ThO имеет дополнительные преимущества благодаря существованию близких уровней противоположной четности (так называемых Ω -дублетов). Измерение ЭДМ может быть выполнено на разных уровнях Ω -дублета, что очень существенно подавляет многие систематические эффекты связанные с магнитным полем или геометрической фазой и при этом удваивает ЭДМ сигнал. Однако верхние и нижние уровни Ω -дублетов имеют несколько различные g -факторы и поэтому, в действительности, систематические эффекты связанные с неучтенным магнитным полем и геометрической фазой полностью не устраняются. Вместе с тем, разница между g -факторами зависит от лабораторного электрического поля и соответствующие систематические эффекты могут быть подавлены в еще большей степени при проведении эксперимента в соответствующем электрическом поле. Поэтому, выяснение закона зависимости g -факторов от внешнего электрического поля важно для анализа возможных систематических эффектов и **дальнейшего увеличения** (текущее значение $d_e < 8.7 \cdot 10^{-29}$ е·см) точности эксперимента на молекуле ThO. В работе [1] совместно с ACME коллаборацией мы рассмотрели g -факторы для Ω -дублетов $J=1,2$ вращательных уровней ThO во внешнем электрическом поле. Нами обнаружено, что Δg для $J=2$ обращается в ноль для $E \sim 50$ В/см (комфортного для проведения эксперимента) электрического поля и много меньше чем Δg для $J=1$ для других электрических полей. Малое значение для Δg означает, что измерения ЭДМ на $J=2$ является еще более устойчивым к проявлению ложных эффектов чем для $J=1$.

A.N. Petrov, L.V. Skripnikov, A.V. Titov, N.R. Hutzler, P.W. Hess, B.R. O'Leary, B. Spaun, D. DeMille, G. Gabrielse, and J.M. Doyle, *Zeeman interaction in ThO $H^3\Delta_1$ for the electron electric-dipole-moment search*, Phys.Rev.A **89**, 062505 (2014)

Thank you!