

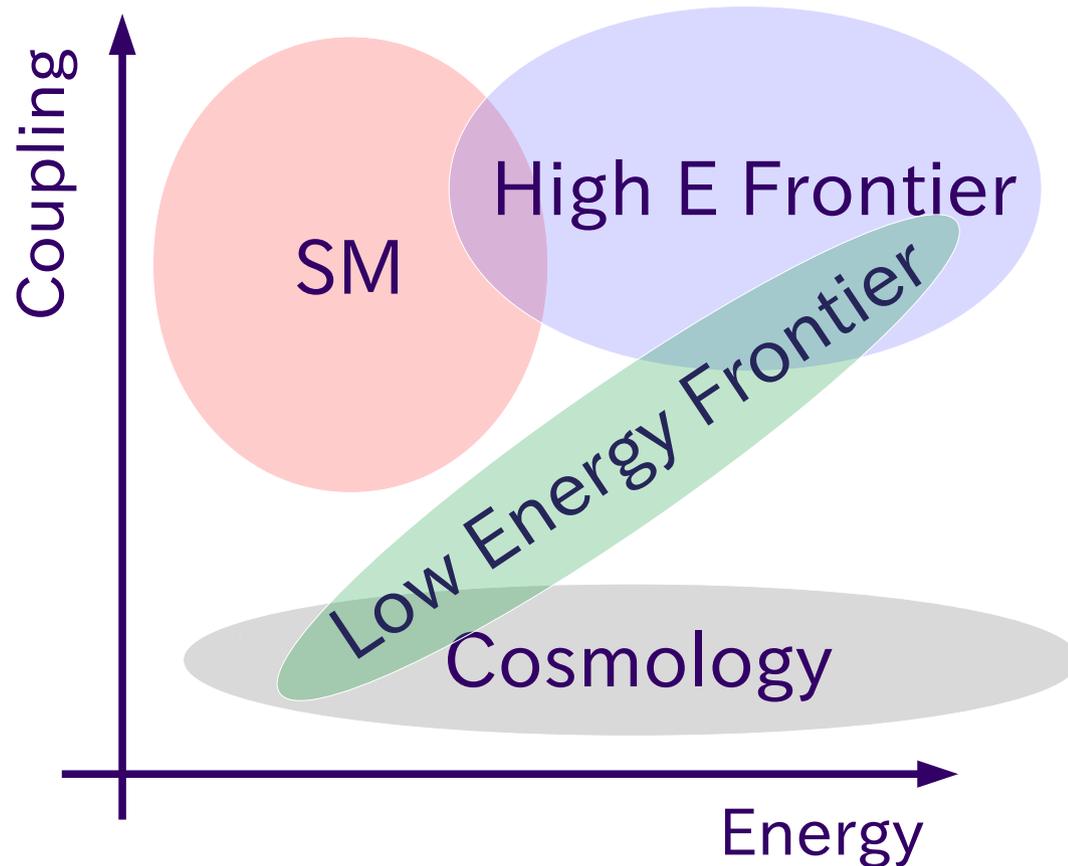
原子スペクトルにおける 同位体効果の精密測定と 素粒子の新しい相互作用

2017/08/01

@基研研究会 素粒子物理学の進展

山本 康裕 (Yonsei U)

三上恭子、田中実(大阪大)との共同研究に基く



$$\text{相互作用} \sim \frac{g}{M}$$

$$\frac{1}{1 \text{ TeV}} = \frac{10^{-4}}{100 \text{ MeV}}$$

- ◆ 弱く相互作用する軽い粒子 { g-2, flavor, Higgsの崩壊, 熱史, 暗黒輻射, CMB, etc.

例えば、 $\frac{g_e - 2}{2} = \begin{cases} -0.001\,159\,652\,180\,73(28)_{\text{EX}} \\ -0.001\,159\,652\,181\,64(76)_{\text{TH}} \end{cases}$

10桁一致!

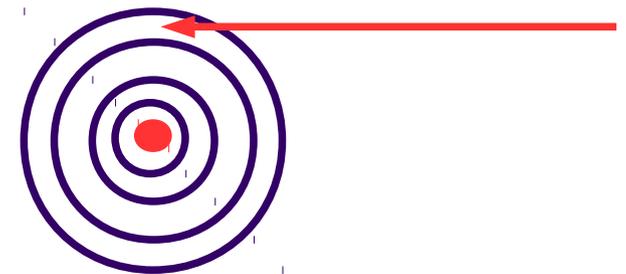
質量：キログラム原器(笑)

長さ：光が1秒間に進む距離

時間：セシウム原子のある遷移energy

▶ 15-16桁の精度 (Hz)
(1億年に1秒くらいずれる。)

▶ 18桁の精度 ~ 5cmの高さ



◆ 他の原子を使って、今後の精度向上が期待されている。

▶ 不定性を減らして新物理の探索に使えないか？

- ◆ 原子スペクトルは同位体で僅かに異なる。

$$\delta H = \delta K + \delta V \quad \blacktriangleright \quad \delta \nu_1 = G_1 \delta \mu + F_1 \delta \langle r^2 \rangle$$

換算質量

原子核のsize

波動関数依存

- ▶ 複数の遷移間で線形関係がある。

1963, W.H.King

$$\frac{\delta \nu_2}{\delta \mu} = \frac{F_2}{F_1} \frac{\delta \nu_1}{\delta \mu} + G_2 - \frac{F_2}{F_1} G_1$$

- ▶ 他の力が原子の中で働いていたら？

◆ 私はHiggsから

1601.05087: C.Delaunay et.al.

▶ 重い粒子に対する感度は無視出来る。

◆ 私は新しい物理から

1704.05068: J.C.Berengut et.al.

1602.04822: C.Frugiuele et.al.

$$\delta H = \delta K + \delta V + \alpha_{G_0} \delta A \frac{e^{-mr}}{r}$$

◆ 私は高次補正から

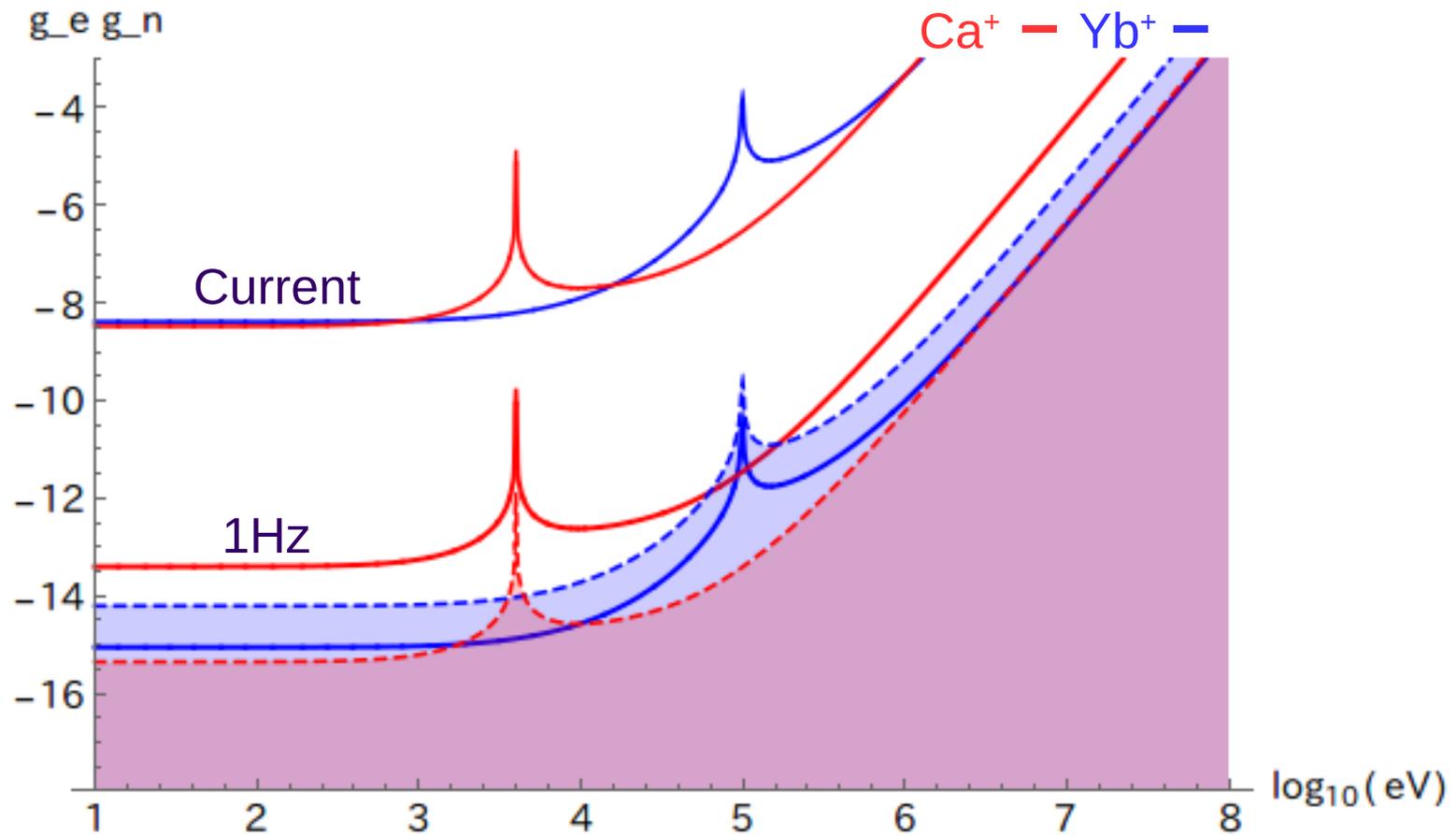
K.Mikami, M.Tanaka, YY

$$\delta\nu_1 = G_1 \delta\mu + F_1 \delta\langle r^2 \rangle + \tilde{F}_1 \delta\langle r^4 \rangle + \dots$$

▶ 更に正しい振る舞いを解析的に議論。

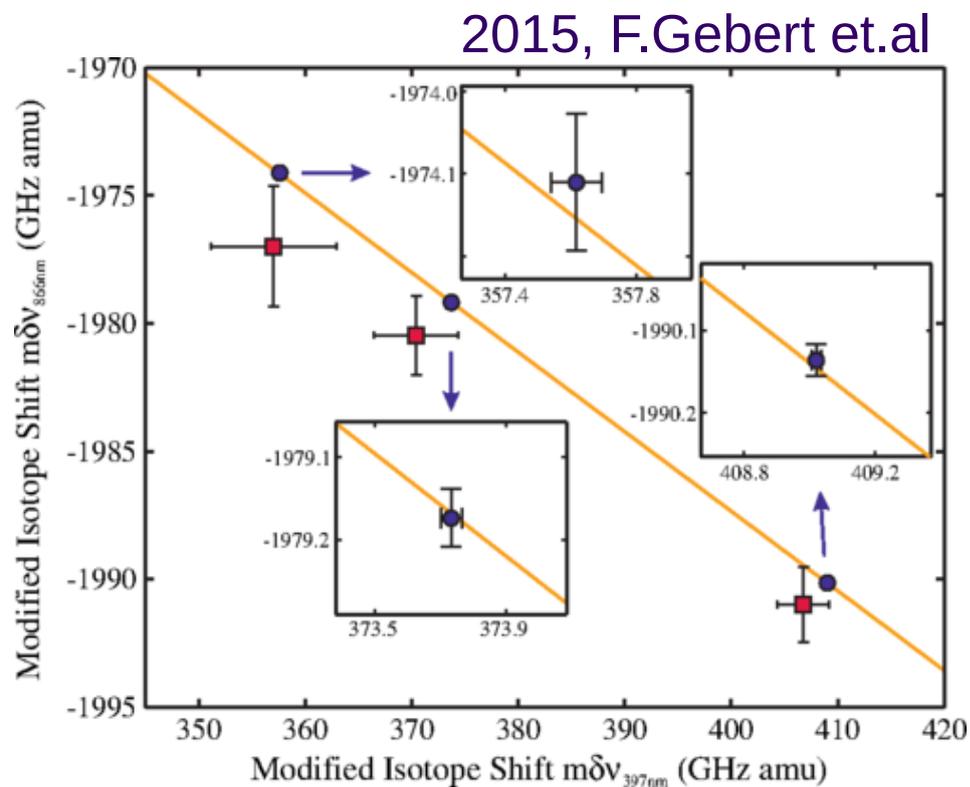
感度 (Preliminary)

06/16



- ◆ 重い所では $1/m^4$ で scale。
- ◆ Field shift が感度を制限。

- ◆ 導入
- ◆ Field shift とは何か
- ◆ Particle shift の性質
- ◆ 計算手法
- ◆ 結果
- ◆ まとめ



定義： $\int d\vec{r} (|\psi_j(\vec{r})|^2 - |\psi_i(\vec{r})|^2) \delta V(\vec{r})$

$-Z\alpha \int d\vec{r}' \frac{\delta\rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$

展開

$$\propto \int_0^\infty dr' \int_0^{r'} dr r^2 \sum_k \xi_k r^k \left(r' - \frac{r'^2}{r} \right) \delta\rho(r')$$

$$\delta\langle r^k \rangle = \int d\vec{r} r^k \delta\rho(r)$$

$$Z\alpha \sum_k \frac{\xi_k}{(k+3)(k+2)} \delta\langle r^{k+2} \rangle$$

The Seltzer moment, 1969

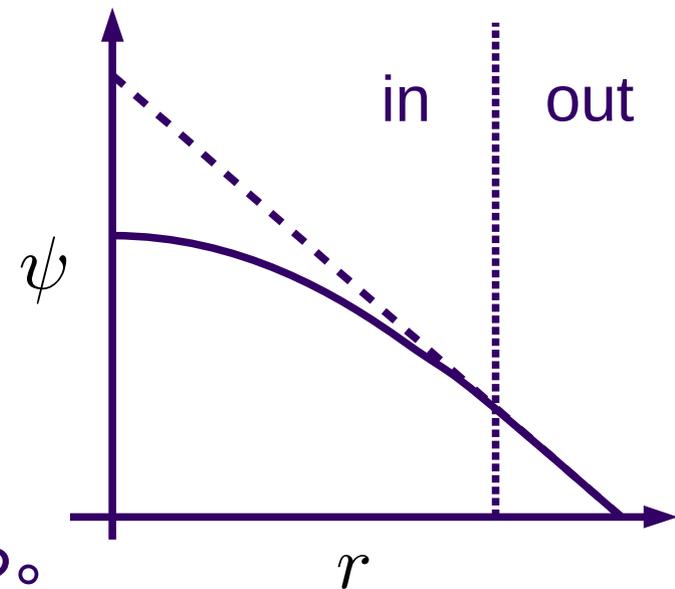
- ▶ いわゆる field shift は $k = 0$ 。
- ▶ Non-zero 角運動量の寄与は r^{2l+2} から。

- ◆ 原点近傍の電荷分布は有限。
 - ▶ Schroedinger 方程式を展開して、解を外と接続する。

$$\psi_{\text{in}}^l(r) = r^l(\chi_0 + \chi_1 r + \chi_2 r^2)$$

$$\begin{cases} \chi_1 = 0 \\ \chi_2/\chi_0 \sim \frac{Z\alpha m_e}{r_N} \end{cases}$$

- ▶ 中心で平坦。
- ▶ Field shift のNLOも、基本的に r^2 の order から。



◆ Isotope shift は

$$\delta\nu_1 = G_1\delta\mu + \frac{F_1\delta\langle r^2 \rangle + \tilde{F}_1\delta\langle r^4 \rangle + \dots}{}$$

$$\int d\vec{r} (|\psi_j(\vec{r})|^2 - |\psi_i(\vec{r})|^2) \delta V(\vec{r})$$


▶ Kingのせんけいせいがやぶれる!

$$\frac{\delta\nu_2}{\delta\mu} = \frac{F_2}{F_1} \frac{\delta\nu_1}{\delta\mu} + G_2 - \frac{F_2}{F_1} G_1 + \frac{\left(\tilde{F}_2 - \frac{F_2}{F_1} \tilde{F}_1 \right)}{\delta\mu}$$

▶ どちらも同じs波を含むと寄与が消える。

▶ s波の寄与がない遷移が支配的になる。

Particle shift

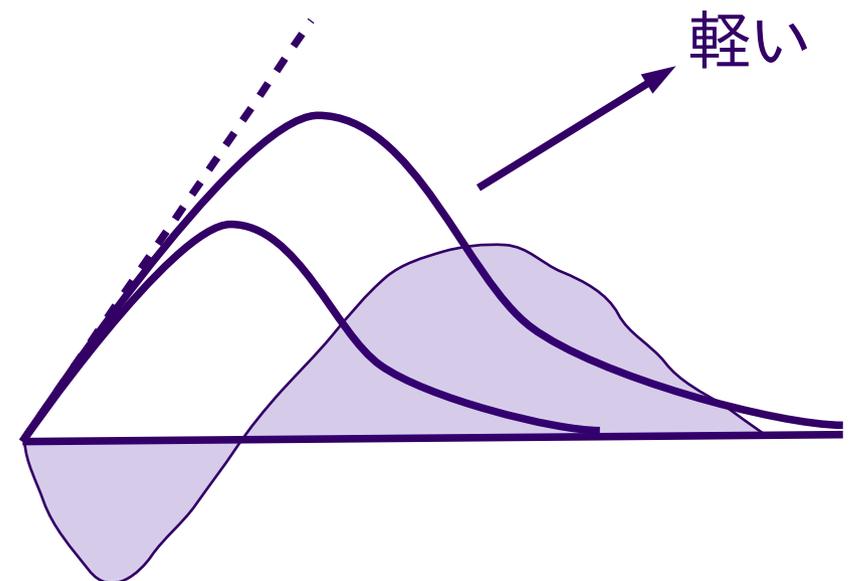
11/16

定義：
$$\int d\vec{r} (|\psi_j(\vec{r})|^2 - |\psi_i(\vec{r})|^2) \alpha_{G_0} \delta A \frac{e^{-mr}}{r}$$

e-n 結合を測る

- ◆ 寄与の仕方は field shift と同じ。
 - ▶ どちらも同じs波を含むと寄与が消える。
 - ▶ s波の寄与がない遷移が支配的になる。

- ◆ 途中で一度相殺する。
- ◆ 波動関数を2つ覆うと感度が飽和する。



- ◆ 原点周りでの展開が良い場合、

$$\int d\vec{r} (|\psi_j(\vec{r})|^2 - |\psi_i(\vec{r})|^2) \alpha_{G_0} \delta A \frac{e^{-mr}}{r} = \alpha_{G_0} \delta A \sum_k \frac{k!}{m^{k+2}} \xi_k$$

- ▶ Isotope shift の言葉では

$$\delta\nu_1 = G_1 \delta\mu + F_1 (\delta\langle r^2 \rangle + c_{(0)}/m^2)$$

$$+ c_{(1)}/m^3 + c_{(2)}/m^4 + \dots$$

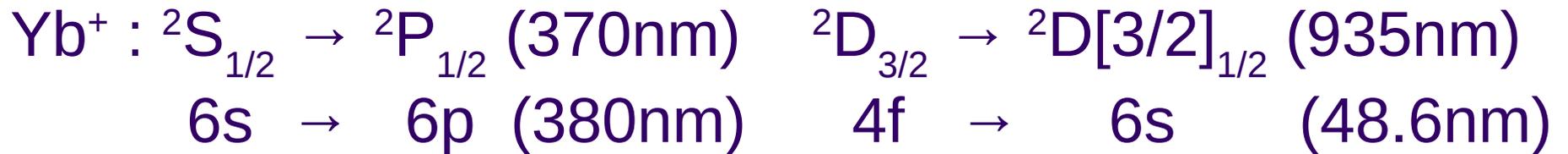
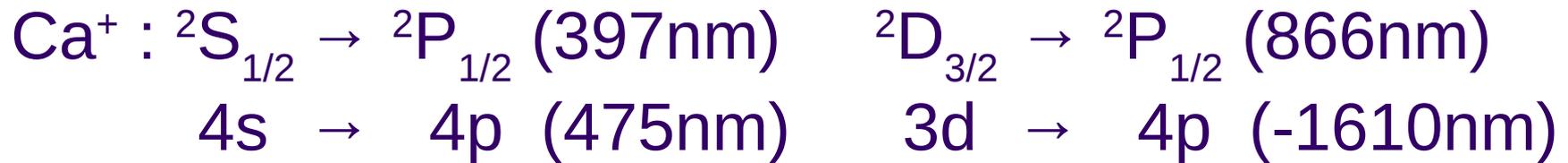
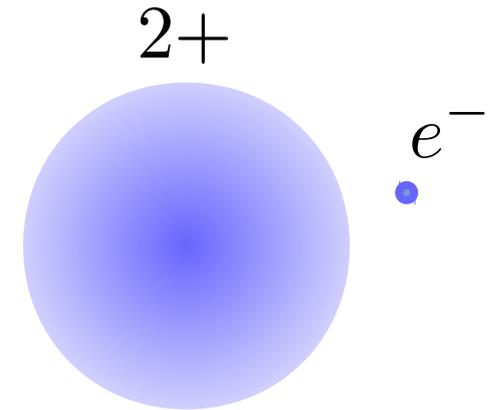
複数のs波が必要

p波の主要な寄与

線形性を破らない

◆ Potential は Thomas-Fermi 模型

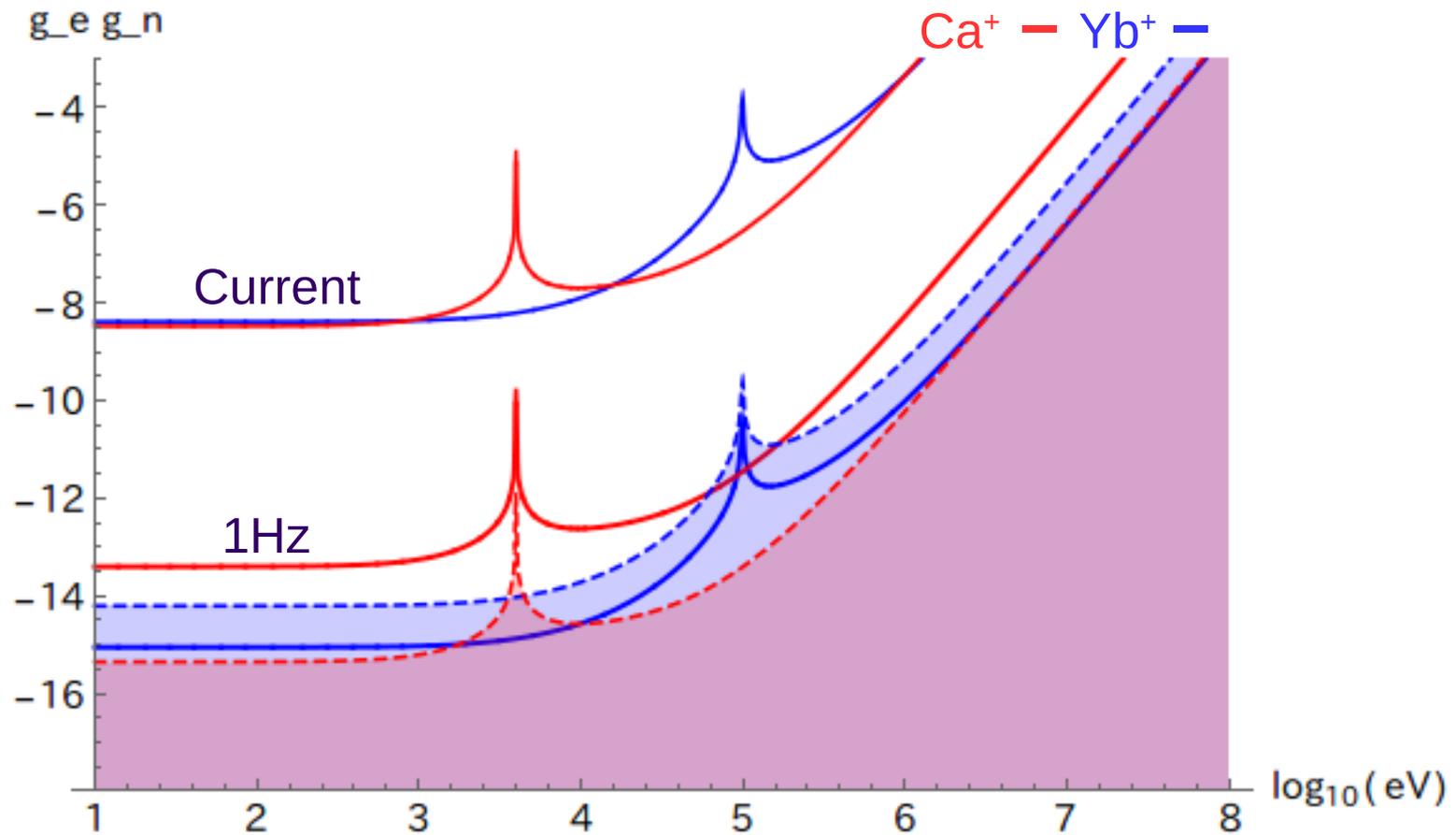
- ▶ 相空間に下から電子を2つずつ詰めていく semi classical 近似。



- ▶ s波とp波は悪くないがd波とf波は良くない。
- ▶ 先行研究と比較すると割りかし合っている。

感度 (Preliminary)

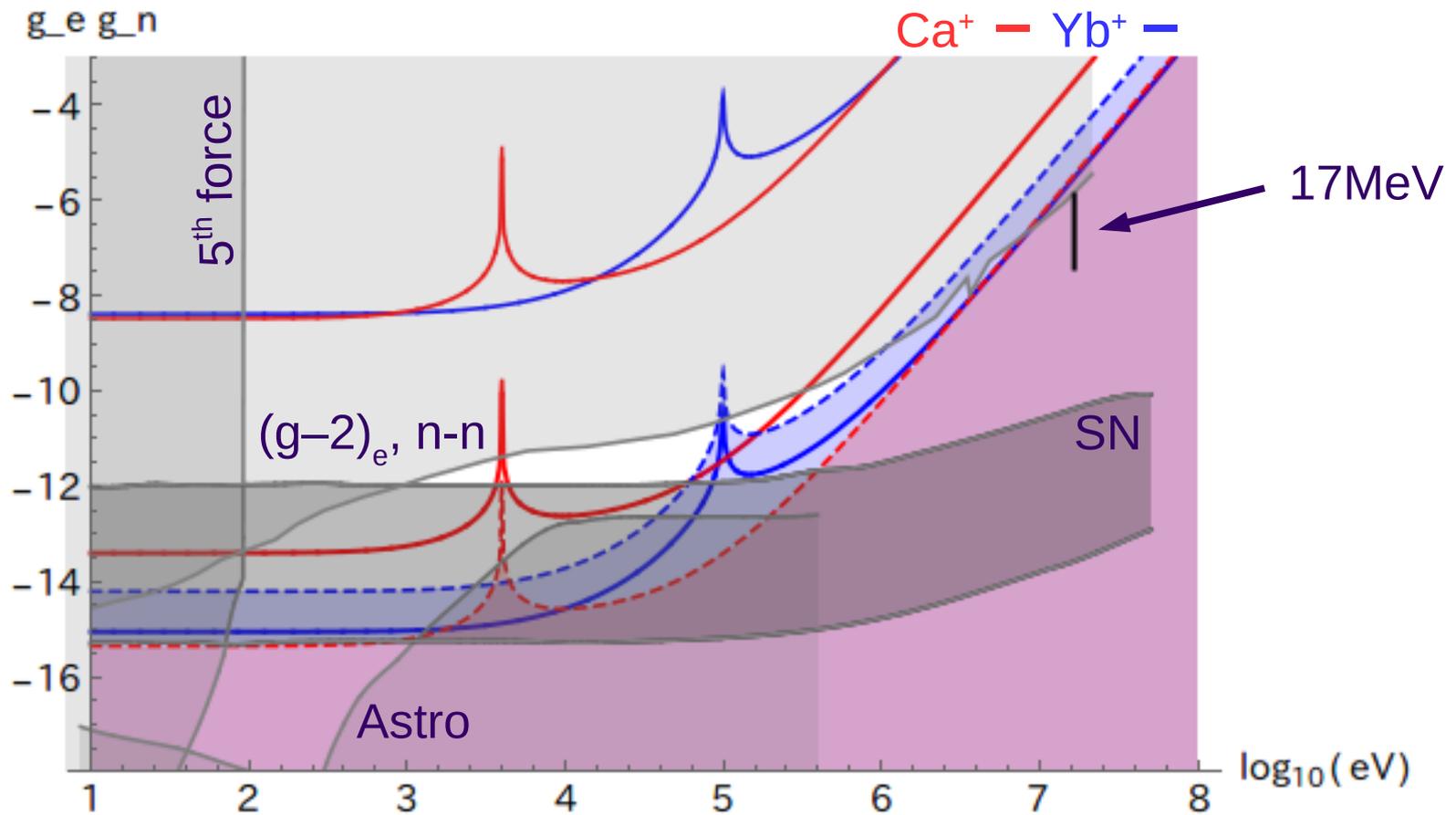
14/16



- ◆ 重い所では $1/m^4$ で scale。
- ◆ Field shift が感度を制限。

制限 (Preliminary)

15/16

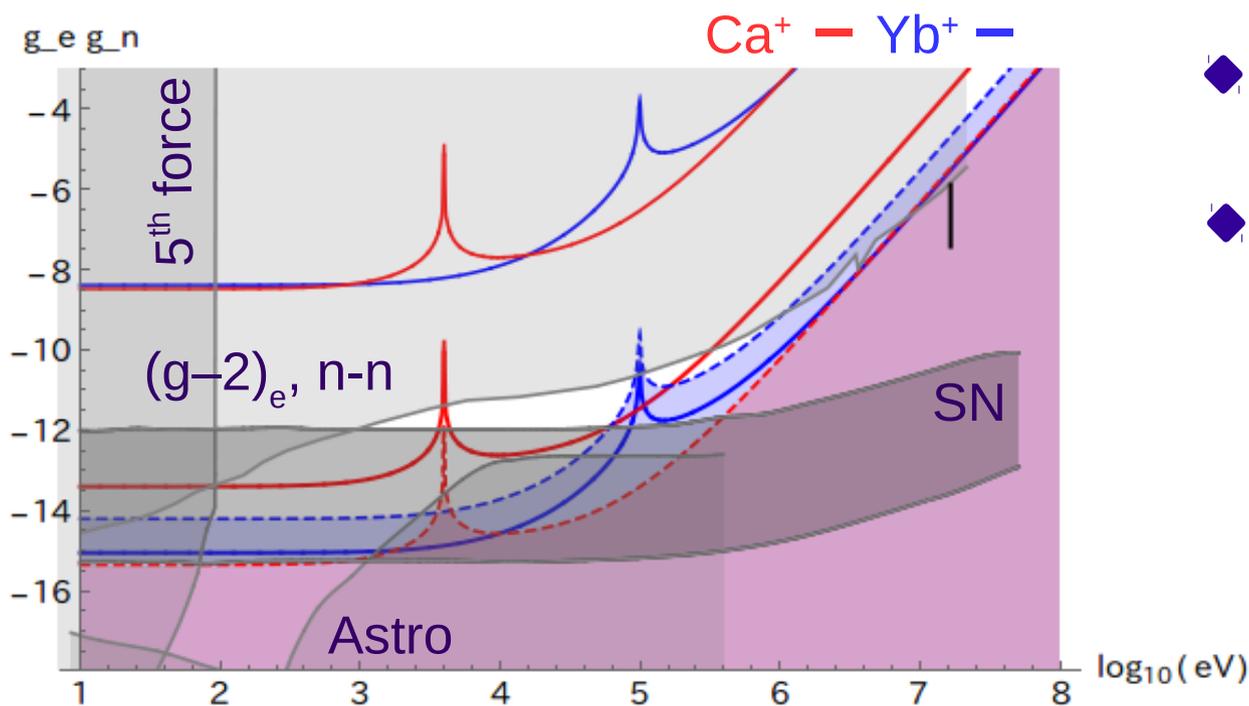


- ◆ 1Hzでの制限はCaとYbで実質的に同程度。
- ◆ Field shift non linearityの制御が重要。

高精度な原子spectroscopy + King's linearity



Non linearity により新しい物理を探索



- ◆ 重い領域の振る舞い
- ◆ FSの非線形性



9/13 S31 15:00
田中さん

昔々あるところに

