

物理学会北陸支部定例学術講演会

12月13日, 2014, 福井大学工学部物理工学科

高スピン核異性体の理論予想

Theoretical predictions of high-spin nuclear isomer

伊藤研人 田嶋直樹 (福井大工)

K. Ito, N. Tajima (Univ. of Fukui)

高スピン核異性体 (nuclear high-spin isomer)

用語

- 核異性体 (nuclear isomer) : 顕著に長い寿命を持つ原子核の励起状態
- 高スピン (high-spin) : 全角運動量 I が大きいこと (原子核の全角運動量は I で表す。)
- イラスト状態 (yrast state) : 全角運動量が指定された値 I である状態のなかで、最低エネルギーの状態
- イラスト線 (yrast line) : イラスト状態のエネルギーを I に対してプロットして得られる曲線

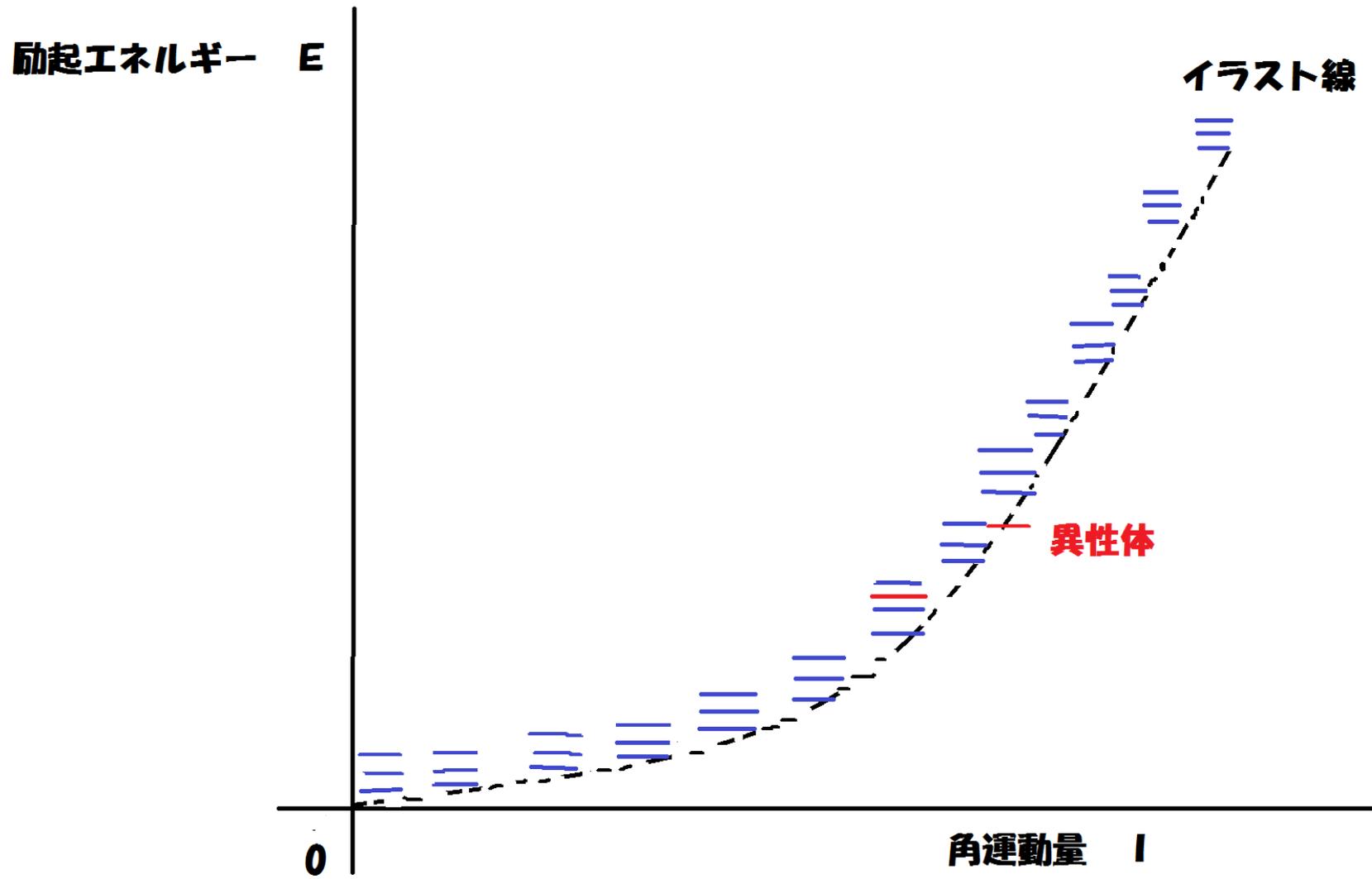
高スピン核異性体の成因

1. イラスト線に近い (スピンが大きい割にはエネルギーが低い)
2. 構造、特に配位 (占有される一粒子状態の組み合わせ) の違い

研究上の価値

1. 原子核物理の実験的研究における寿命の長さの利用
2. ガンマ線レーザー等の将来の技術的利用
3. 核構造論にとって多準粒子励起状態の希少な情報源
イラスト線付近は状態密度が低いので、状態の混合が小さい。
励起エネルギーが同程度でも、スピンの小さいと、同じ I の状態の密度が高いため、配位が混合が大きい。

イラスト線の概略図



独立粒子模型から平均場模型まで

独立粒子模型

- 個々の核子が一体場（ポテンシャル）中を独立に運動する。
- 歴史: 1950年、スピン軌道ポテンシャルの導入により魔法数の再現に成功。それ以前は原子核はもっぱら量子カオスの側面(複合核)が注目されていた。

ニルソン軌道

- 四重極変形した原子核中の一粒子状態 (=軌道) とエネルギー準位
- 殻補正法の考え方が有効
殻補正法 (Strutinsky, 1967年) とは、(量子力学的な一粒子準位の持つ) 微視的側面と (古典力学の液滴のような) 巨視的側面を折衷する妙手。
変形や核異性体の出現は、もっぱらフェルミ準位付近にある一粒子準位が引き起こす。

平均場法

- 現象論的に導入されていた一体場を、微視的模型から出発して自己無撞着に決定する
- 本研究では扱い易い **Hartree-Fock (HF) + BCS** の枠組を採用する (⇔ 次講演の **HFB** 法)

Skyrme 有効相互作用

- ゼロレンジ力に相対運動量依存性と密度依存性を加味したもので、パラメータは平均場法専用決定する。
- 1956年に提唱され、20年前頃より現在まで最有力な核構造計算手法
- 殻補正法の目的を達成できる、堅固な基礎を持つ代替の手法と言える。
- 物性物理学の密度汎関数法(1964年)のようにも見える。
密度汎関数法の実態は局所密度近似であるが、正にその近似の形式内で現象論を貫いたものであるとも言える。

HF+BCS法

陽子系、中性子系の状態がそれぞれ下記のBCS変分関数であるとして、Skyrme相互作用を使った核子系のハミルトニアン H の期待値を最小にする。

$$|\Psi\rangle = \prod_{i>0} (u_i + v_i a_i^\dagger a_{\bar{i}}^\dagger) |0\rangle$$

a_i^\dagger : 一粒子状態 $|\phi_i\rangle$ に粒子 (核子) を生成する演算子

状態 ϕ_i と $\phi_{\bar{i}}$ は時間反転対をなす。(粒子数が偶数の系の基底状態では正確にそうなる)

1. $\{u_i, v_i\}$ は、 $\{\phi_i, \phi_{\bar{i}}\}$ を固定して変分法で決定する。 $u_i^2 + v_i^2 = 1$

2. $\{\phi_i, \phi_{\bar{i}}\}$ は、 $\{u_i, v_i\}$ を固定して変分法で決定する。 $\langle \phi_i | \phi_j \rangle = \delta_{ij}$

1と2を繰り返して計算する。変分解 $|\Psi\rangle$ は偶々核 (陽子の個数、中性子の個数が共に偶数の原子核) の基底状態を表す。

この基底状態の、一粒子状態 ϕ_i に関連した準粒子を励起するためのエネルギーは：

$$E_i = \sqrt{(\epsilon_i - \epsilon_F)^2 + \Delta^2}$$

ϵ_i は、一粒子状態 ϕ_i のエネルギー準位

ϵ_F は、フェルミ準位

Δ は、対相関ギャップエネルギー (pairing gap)

奇数個の準粒子が励起した状態は、奇核（陽子の個数または中性子の個数が奇数の原子核）の状態を表す。

奇々核（陽子の個数も中性子の個数も奇数である原子核）の状態も同様にして表せる。

本研究では、準粒子励起エネルギーの和として、核異性体の励起エネルギーを計算する。

$N = 83$ isotone (中性子の個数が83の原子核) の高スピン核異性体の系統的研究

Odahara et al., Phys. Rev. C, 72, 061303 (2005).

$N = 83, 60 \leq Z \leq 67$ の原子核の $I^\pi = 49/2^+, 27^+$ 異性体を実験的に観測した。

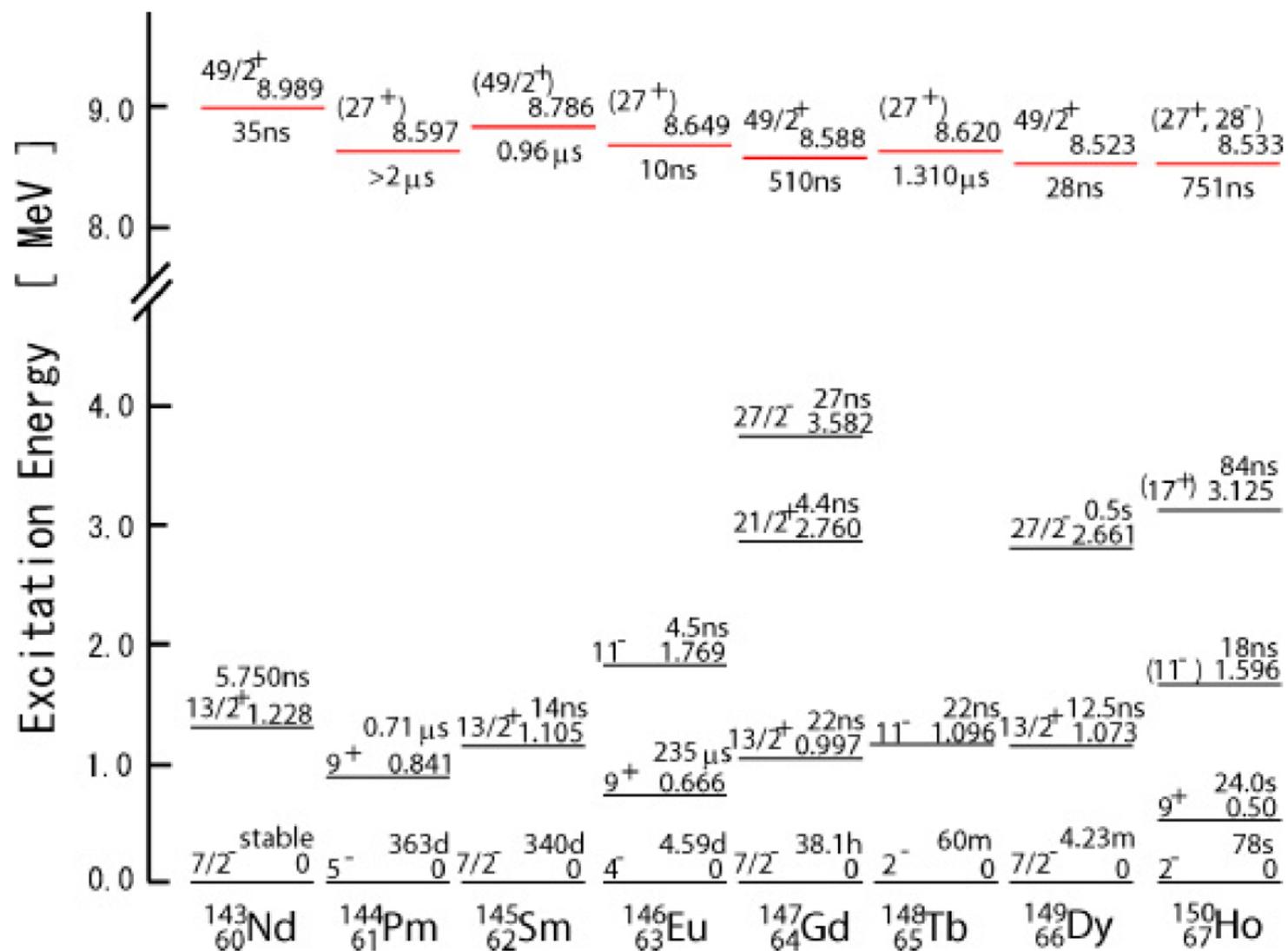
論文で示された比較対象の理論計算は、

- 主に殻補正法によるもの
- 平均場法によるものは、対相関を無視した Hartree-Fock 法によるもの

HF+BCS 法で対相関を含んだ平均場計算を論じる余地は残されている。

Odahara et al. の論文の主題は、核の全エネルギーが Z (陽子の個数) の偶奇で振動する際の振幅から、異性体配位での陽子の対相関ギャップ Δ を導いたことであるが、本研究の主題は **HF+BCS** 法で、この振動幅を研究する前段階として、まずは、励起エネルギーをできる限り再現するよう努めることである。

再現する実験データ



Z が偶数の原子核

基底状態 ($I^\pi = 7/2^+$) の (核子系全体としての) エネルギーは

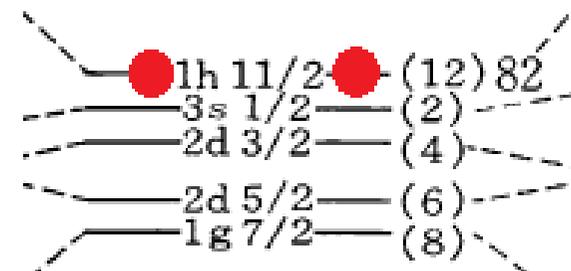
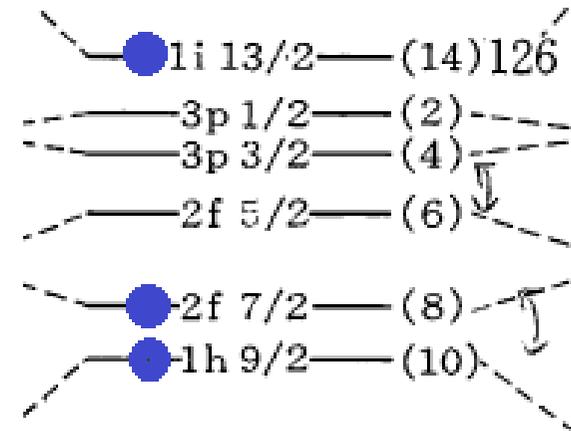
$$E_{\text{ground}} = E_{\nu f 7/2} + E_{0\text{qp}}$$

異性体 ($I^\pi = 49/2^+$) のエネルギーは

$$E_{49/2^+} = E_{\nu f 7/2} + E_{\nu h 9/2} + E_{\nu i 13/2} + 2E_{\pi h 11/2} + E_{0\text{qp}}$$

異性体の励起エネルギーは

$$E_{49/2^+}^* = E_{49/2^+} - E_{\text{ground}}$$



陽子を赤、中性子を青で表示

Z が奇数の原子核

基底状態 ($I^\pi = 2^-, 4^-, 5^-$) の (核子系全体としての) エネルギーは

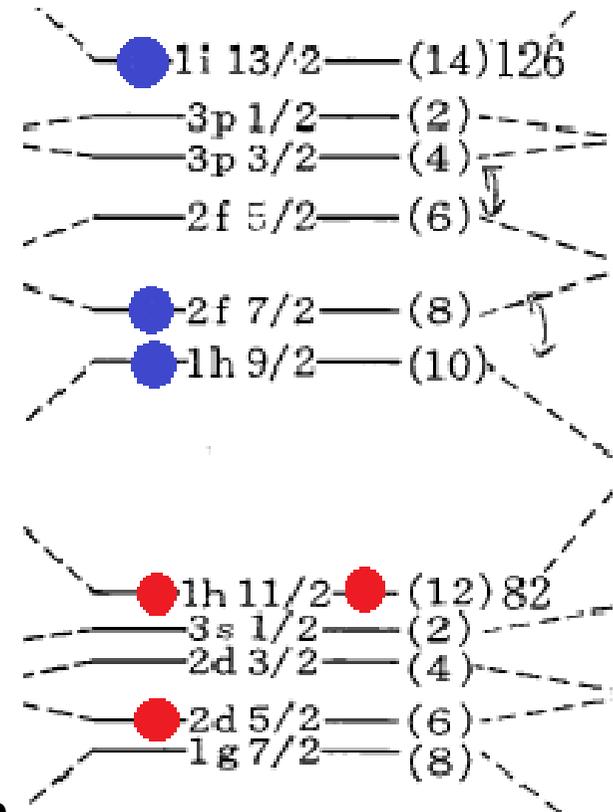
$$E_{\text{ground}} = E_{\nu f 7/2} + E_{\pi d 5/2} + E_{0\text{qp}}$$

異性体 ($I^\pi = 27^+$) のエネルギーは

$$E_{27^+} = E_{\nu f 7/2} + E_{\nu h 9/2} + E_{\nu i 13/2} + 2E_{\pi h 11/2} + E_{\pi d 5/2} + E_{0\text{qp}}$$

異性体の励起エネルギーは

$$E_{27^+}^* = E_{27^+} - E_{\text{ground}}$$



陽子を赤、中性子を青で表示

計算の設定

Skyrme 相互作用を用いる平均場法の数値計算プログラムとしては下記の公開プログラムを用いた

HFODD

- **J. Dobaczewski, J.Dudek, et al., Comp. Phys. Comm., 102, 166 (1997).**
- **N. Schunck, J. Dobaczewski, et al., Comp. Phys. Comm., 183, 166 (2012).**

HFODD を使用する利点および意義については下記を参照されたい。

- 「平均場モデルによる奇核・奇々核の配位決定」

伊藤研人, 杉浦友章, 田嶋直樹, 日本物理学会第69回年次大会講演, 講演番号27pTB-4 (2013)

http://apphy.u-fukui.ac.jp/~tajima/jpsm14sp_slide.pdf

以下では下記の設定を様々に変化させて計算を行い、結果を比較する。

1. Skyrme 相互作用のパラメータセット

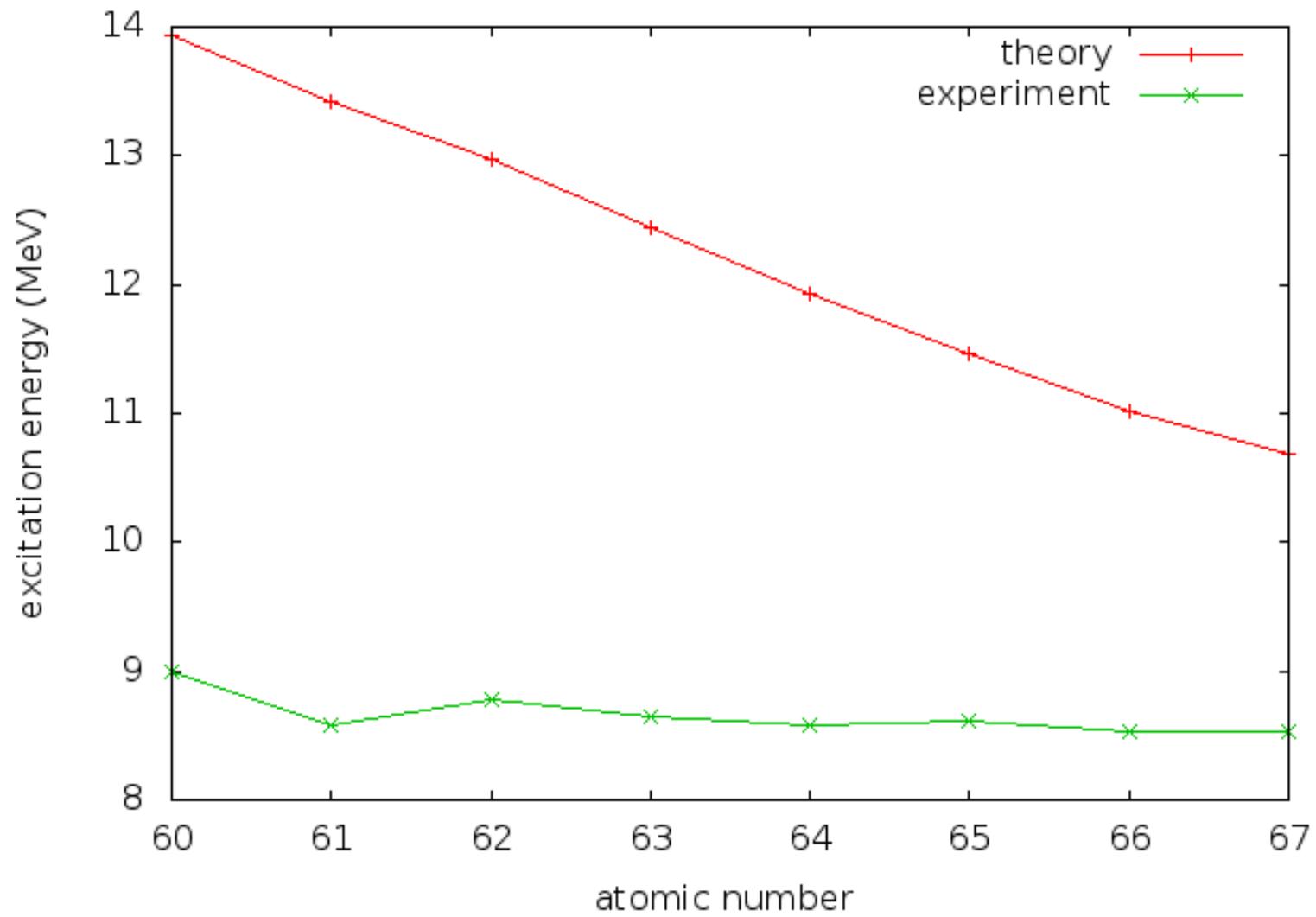
2. 対相関ギャップ

計算結果

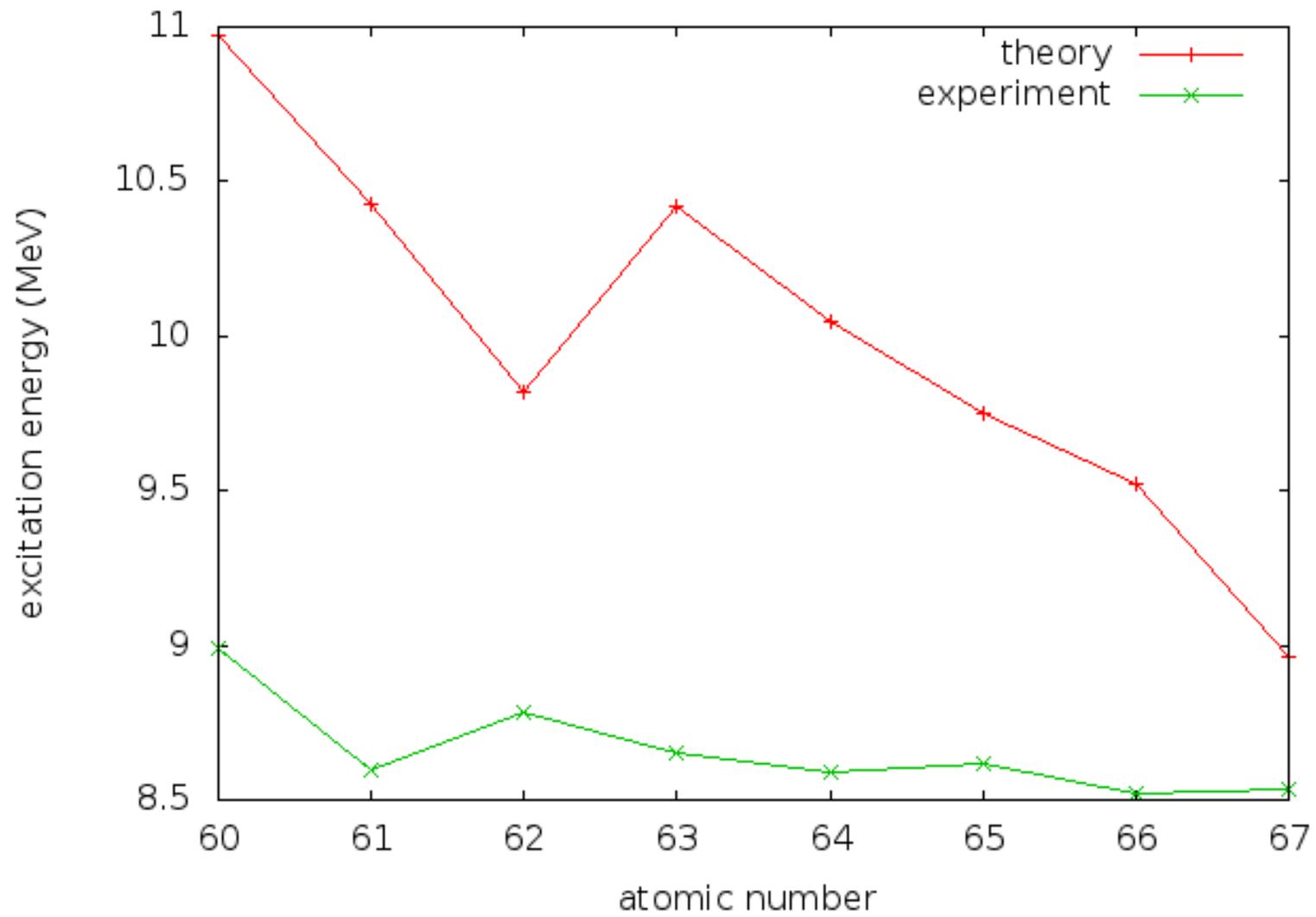
Skyrme相互作用のパラメータセットとして SLy4, SIII, SKM* 等のポピュラーなもの 10 個を用い、対相関ギャップとして、下記の経験式の与える値を用いて計算を行う。

$$\Delta = 12 / \sqrt{A} \text{ (MeV)} \approx 0.993 \text{ MeV} \quad (A \text{ は核子の総数, } A = N + Z) \cdots (1)$$

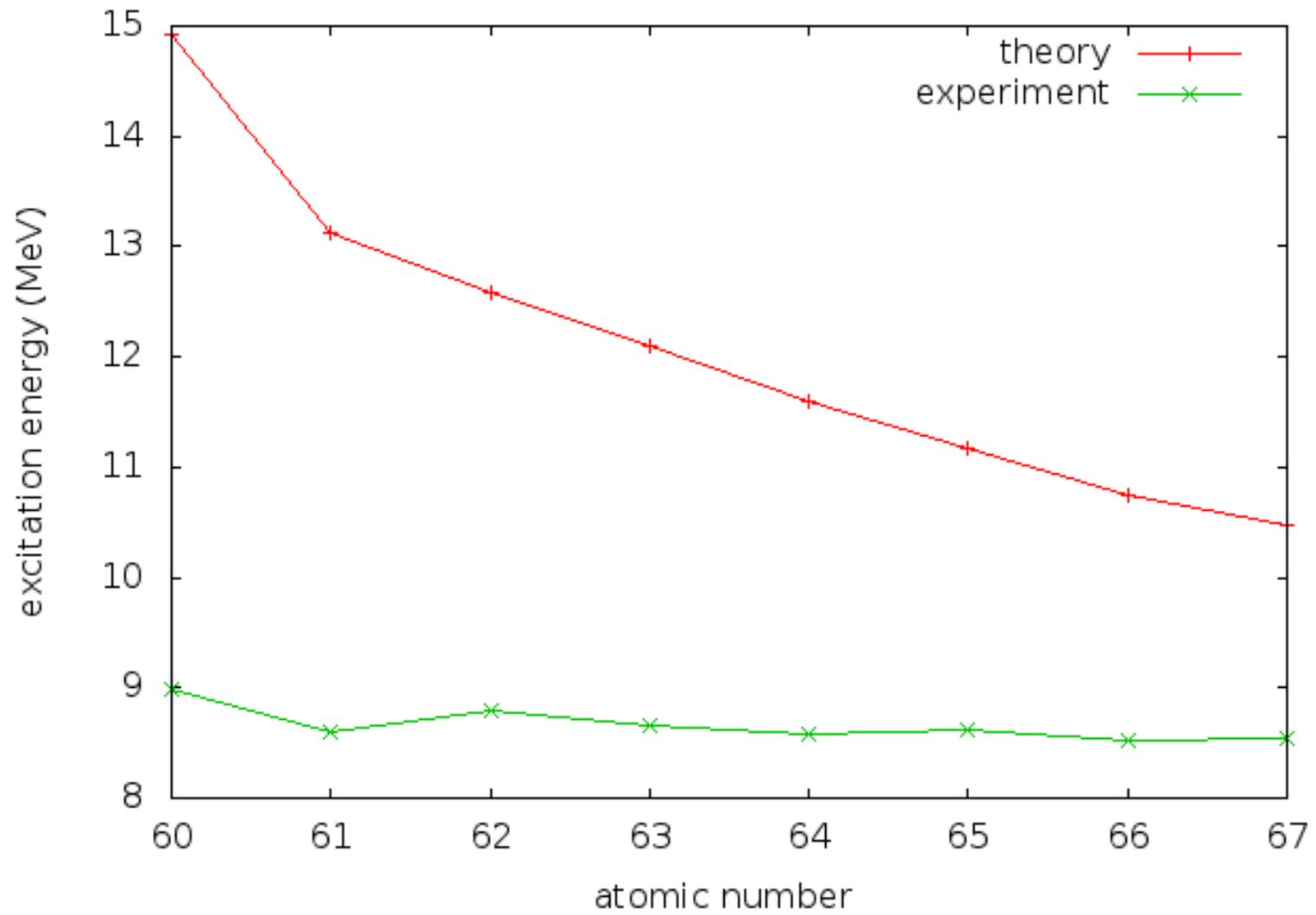
SLy4 standard pairing gap



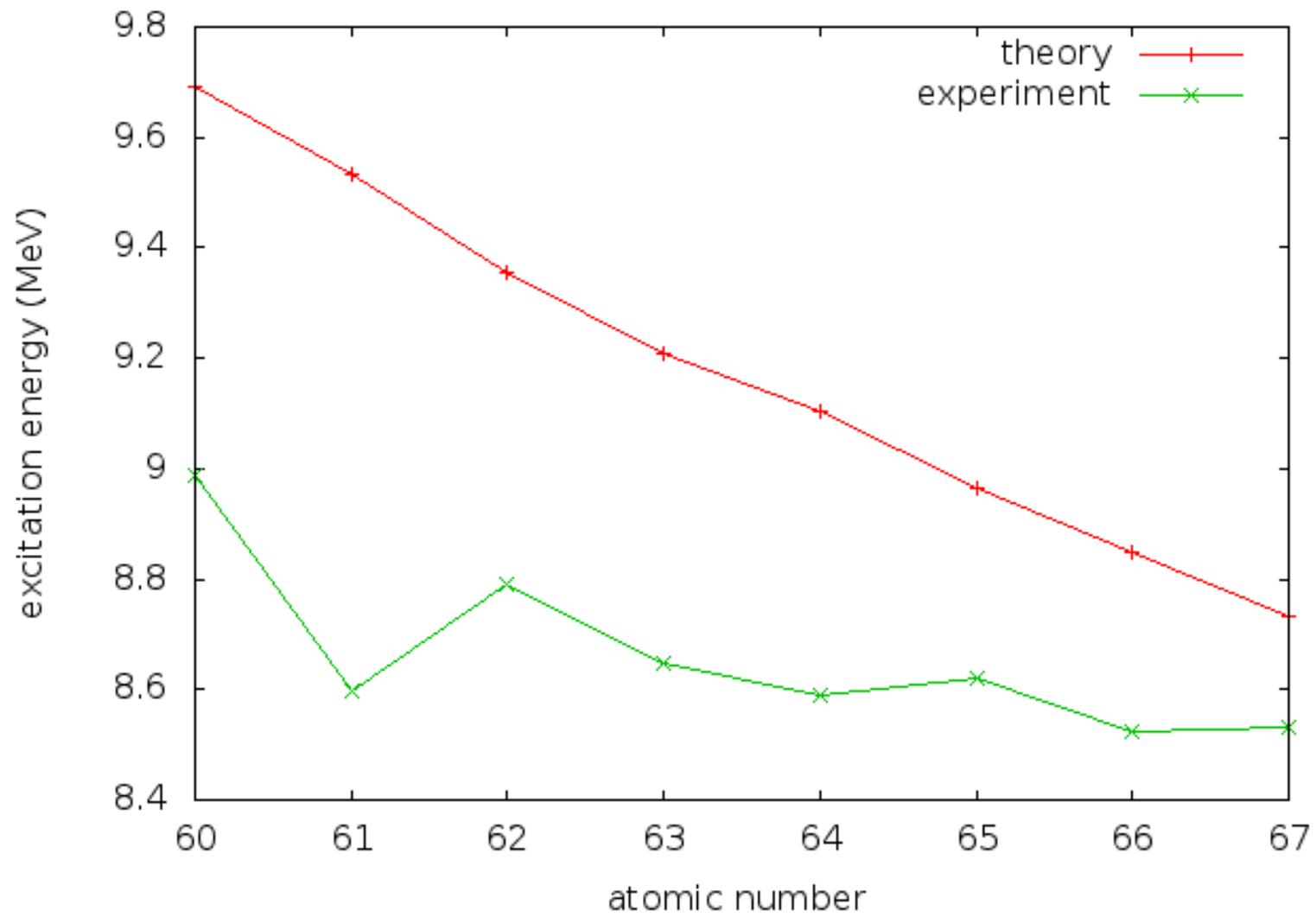
SIII standard pairing gap



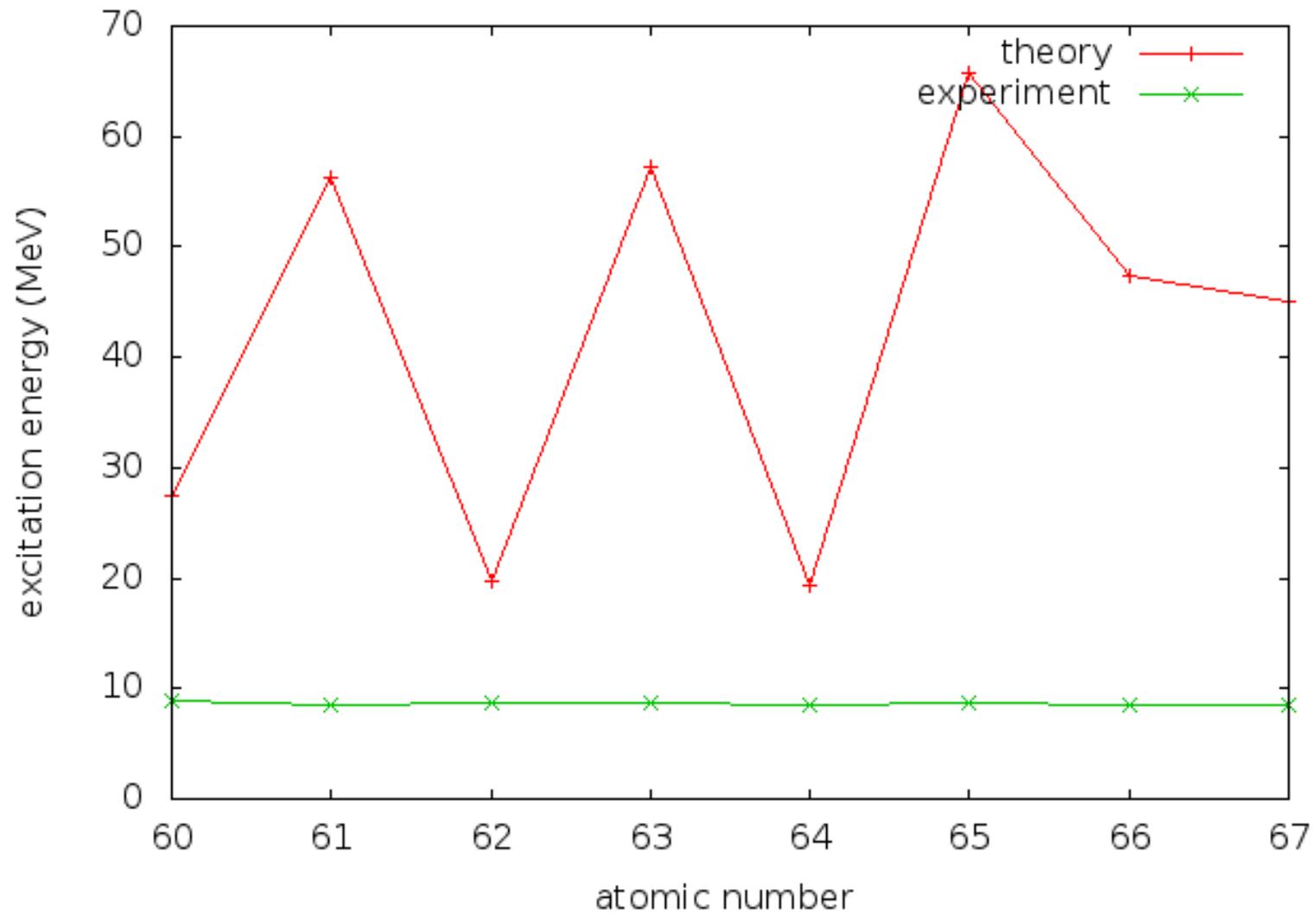
SKM* standard pairing gap



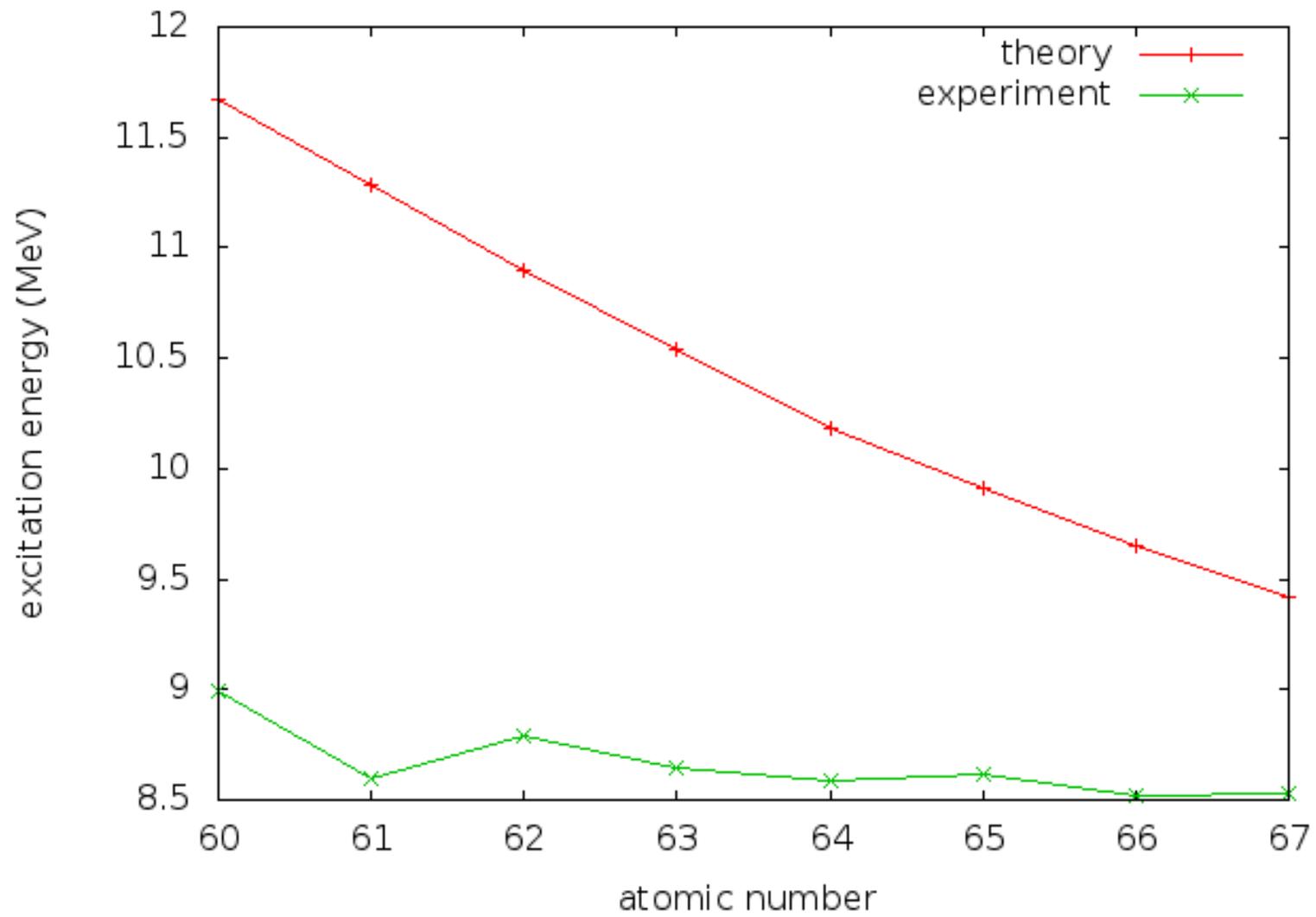
SKXC standard pairing gap



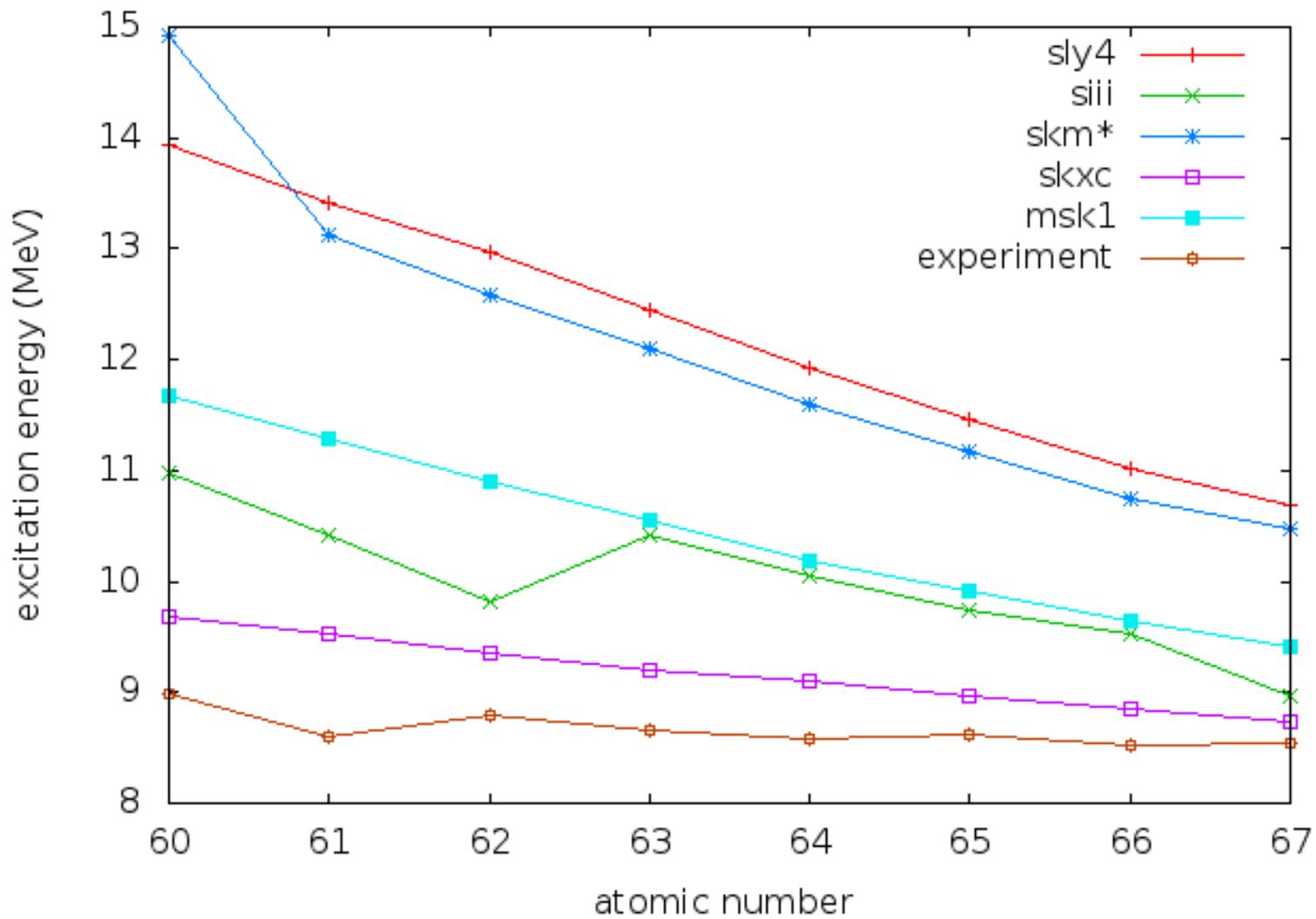
SKO standard pairing gap



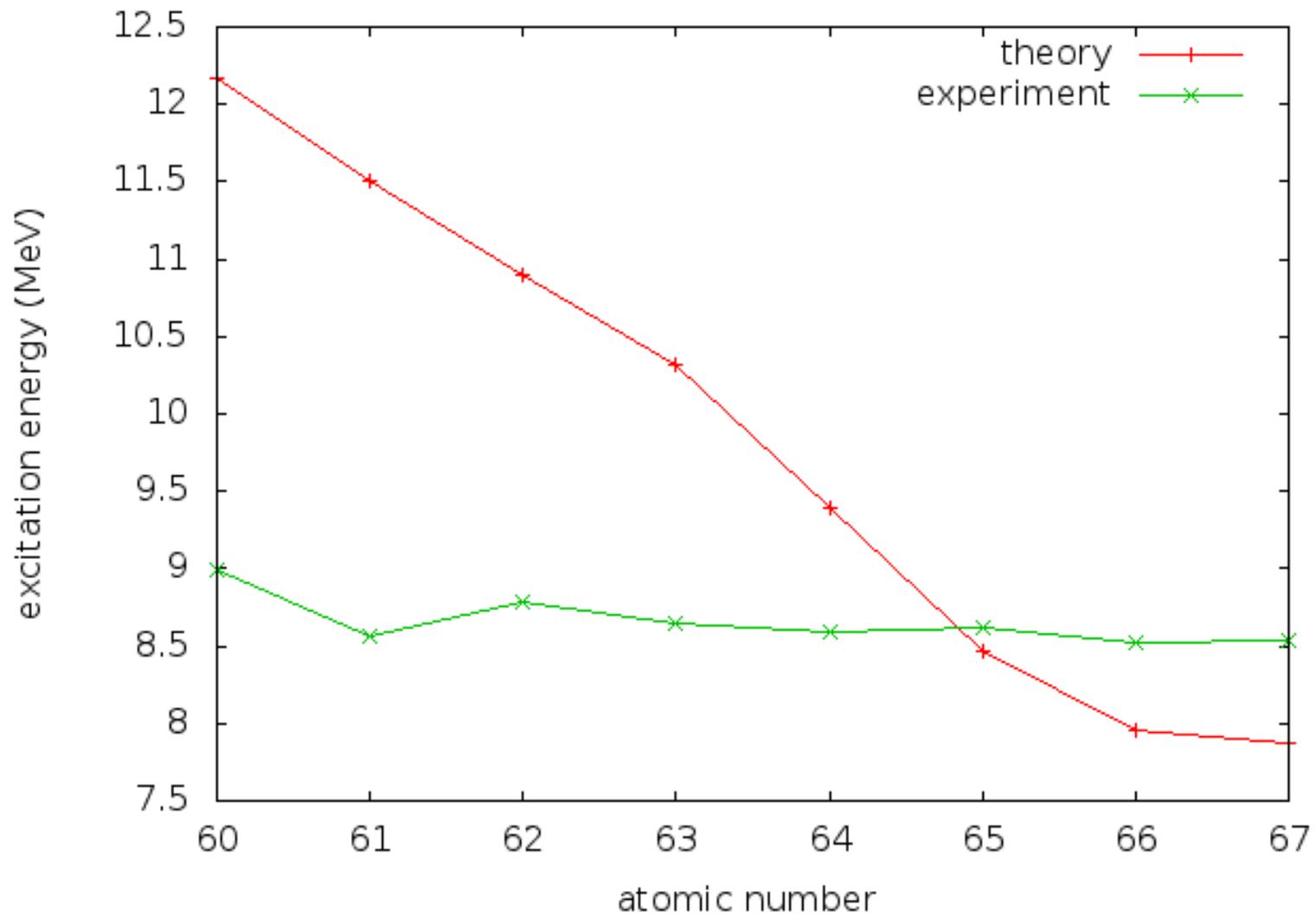
MSK1 standard pairing gap



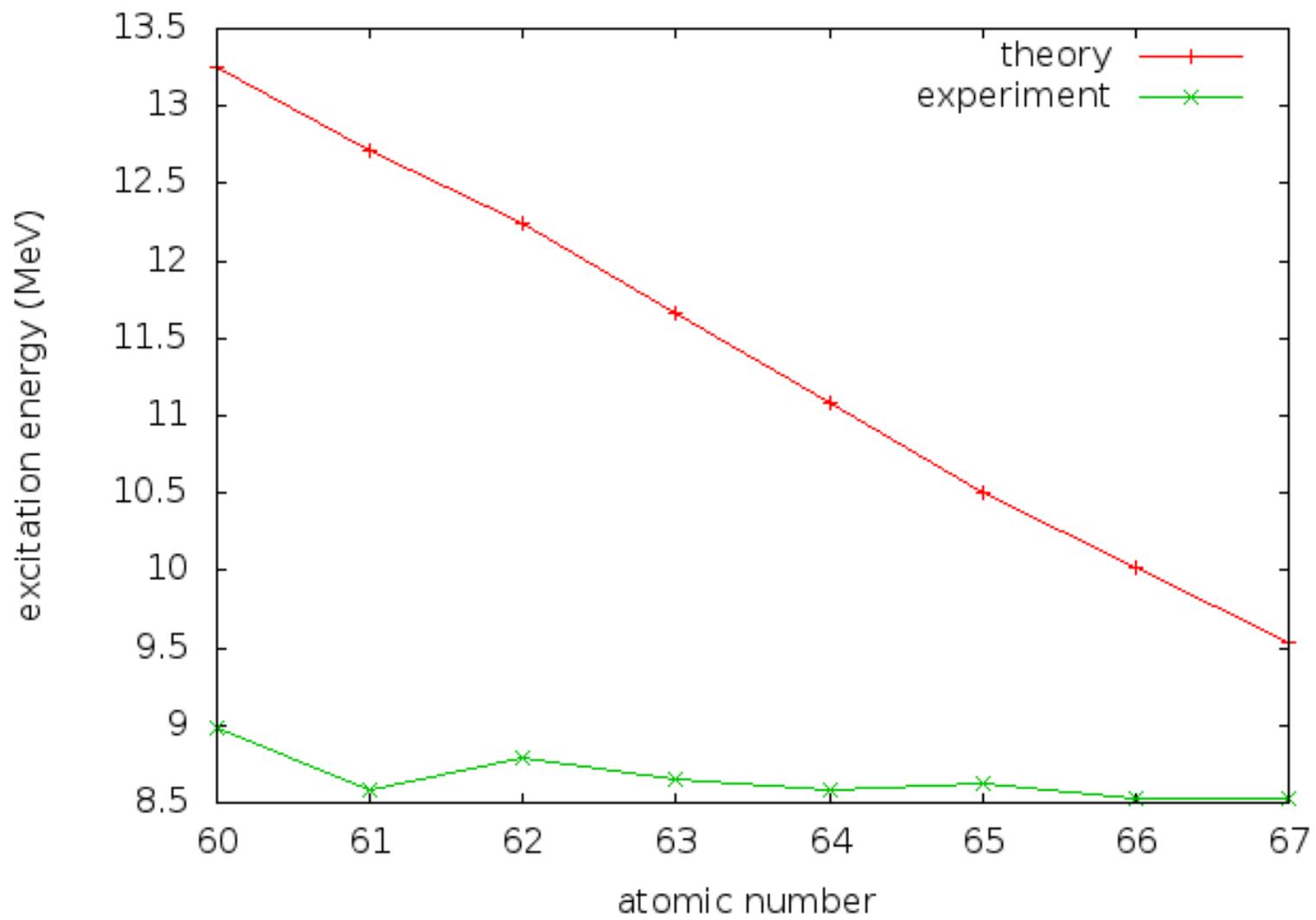
different Skyrme parameter set



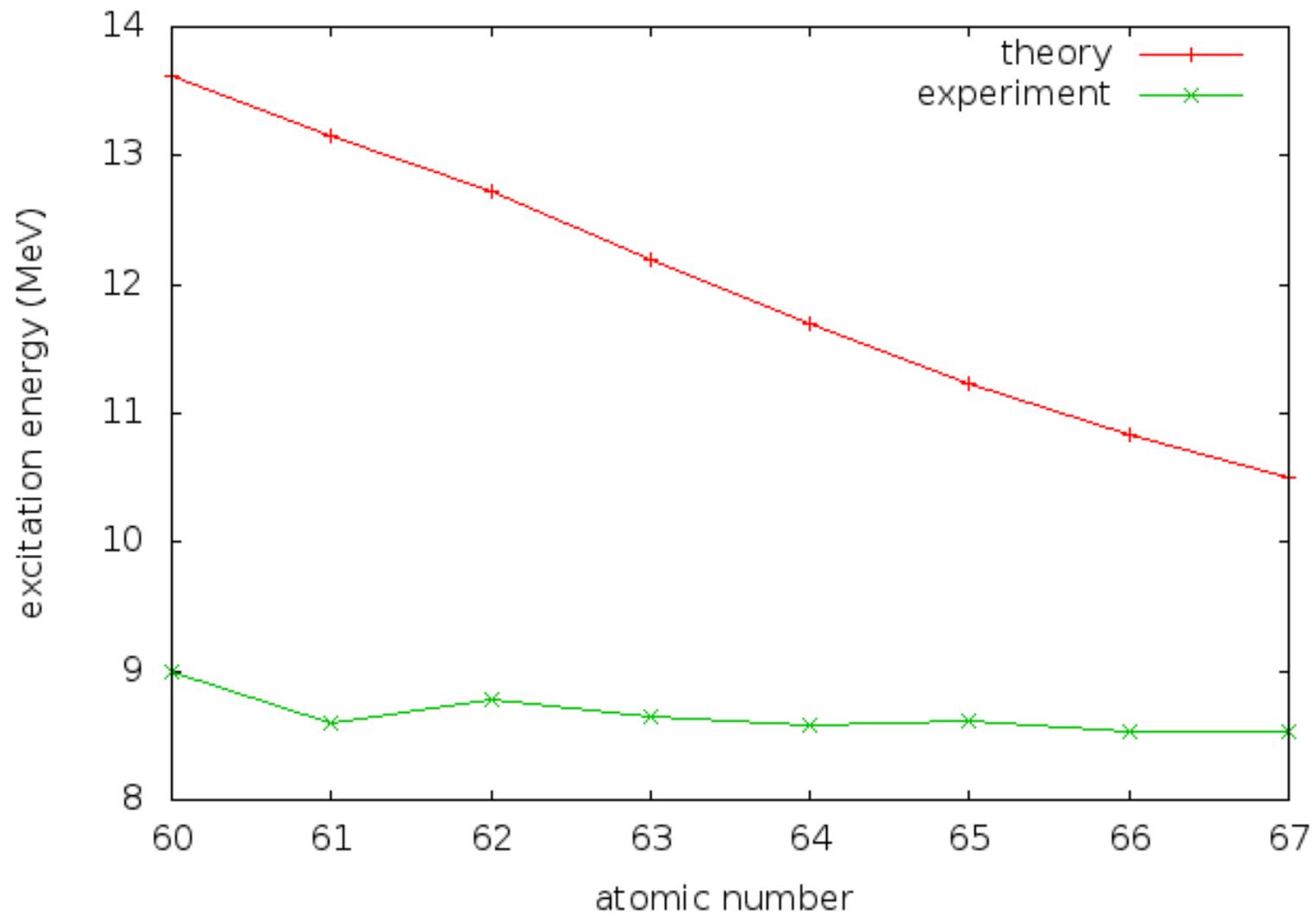
SLy4 half pairing gap



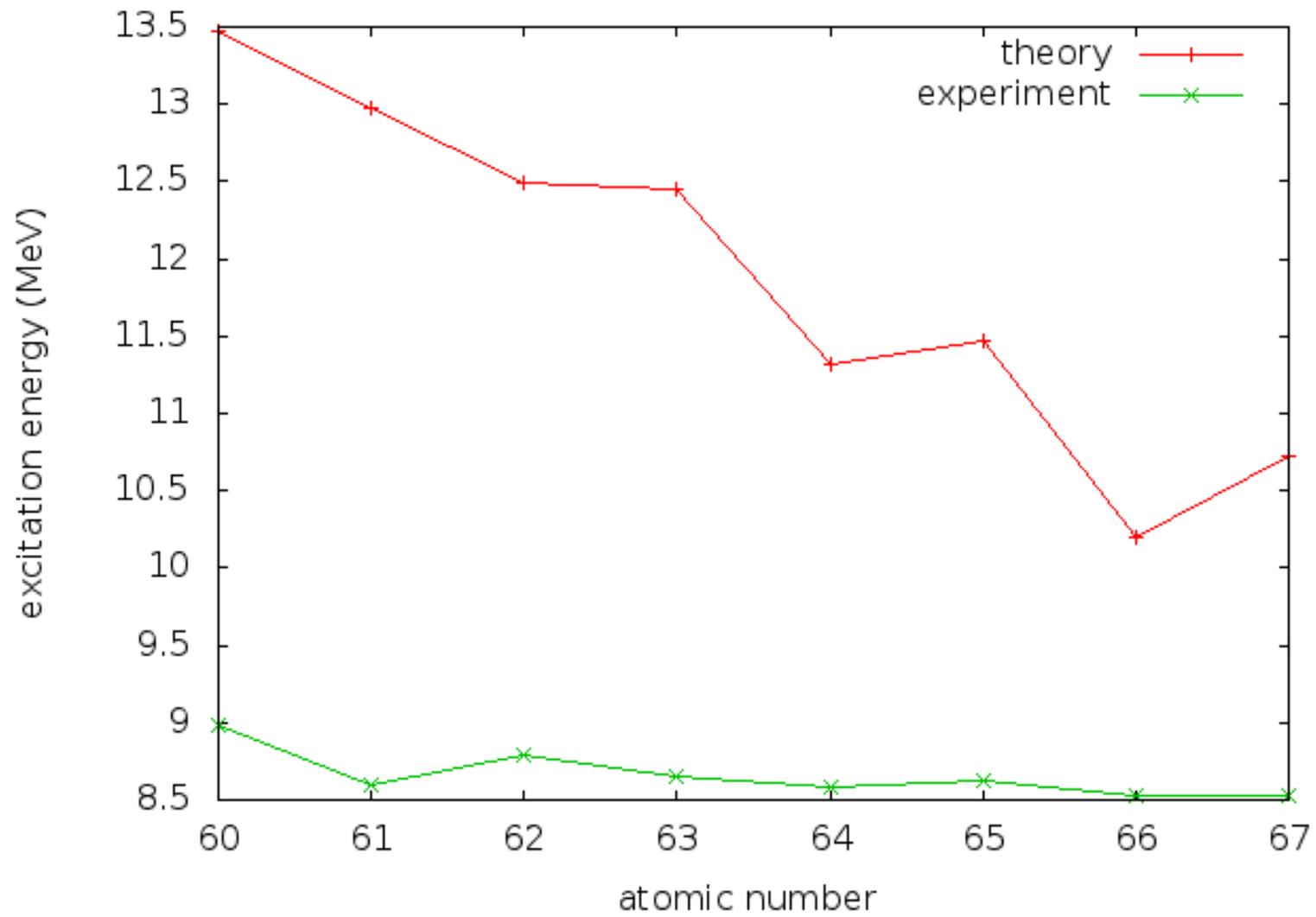
SLy4 no pairing gap



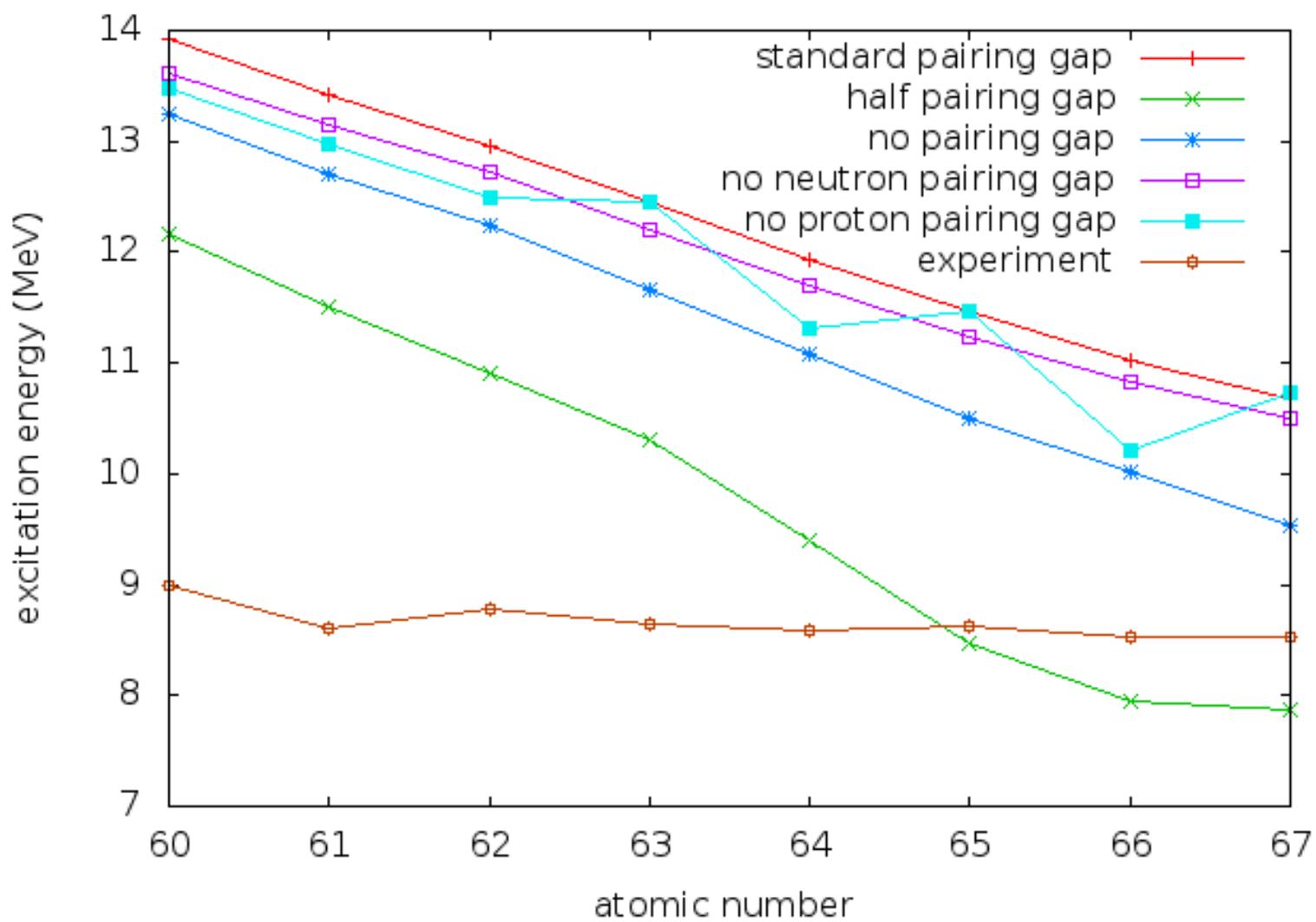
Sly4 no neutron pairing gap



Sly4 no proton pairing gap



SLy4 different pairing gap



結果のまとめ

- 対相関ギャップを変えると、エネルギーを上下にシフトすることができるが、陽子数を横軸にとったグラフの傾きは変えられない。
- 中性子の対相関ギャップを入れると、励起エネルギーにばらつきが生じる。
- **Skyrme** 相互作用に **SKXC (1)** を用いると実験値に近いものを得ることができる。
(1) B.A. Brown, Phys. Rev. C, 58, 220 (1998)

今後の研究としてパラメータセットに**SKXC**を用いて、今回調べた原子核付近の核を調べる。