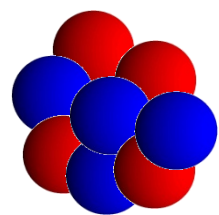


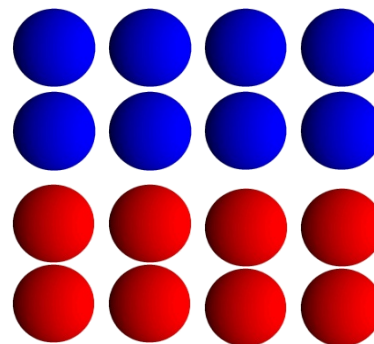
原子核の質量



${}^{16}_8\text{O}_8$

$8p + 8n$

B
(束縛エネルギー)

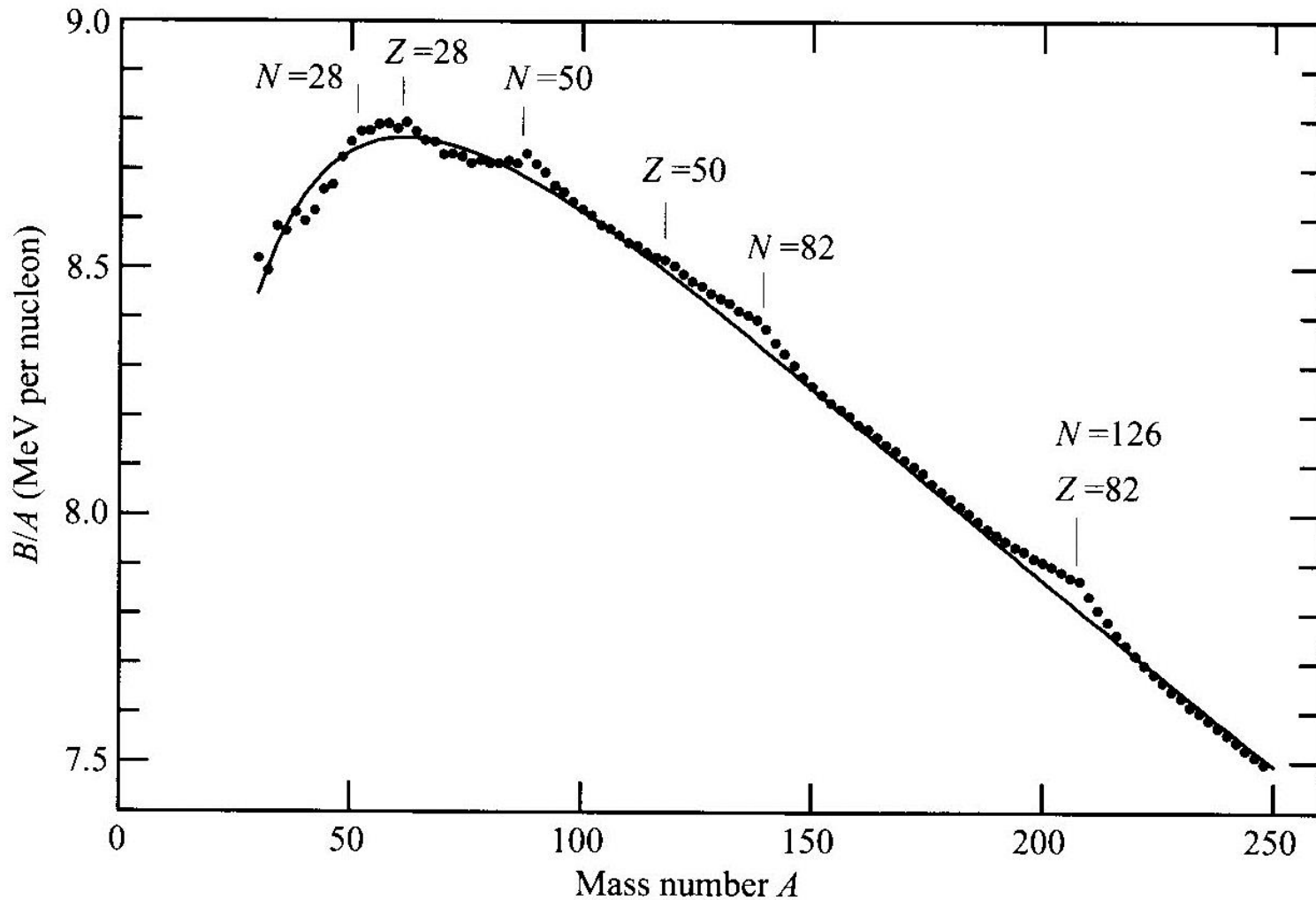


$$m(N, Z)c^2 = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - B$$

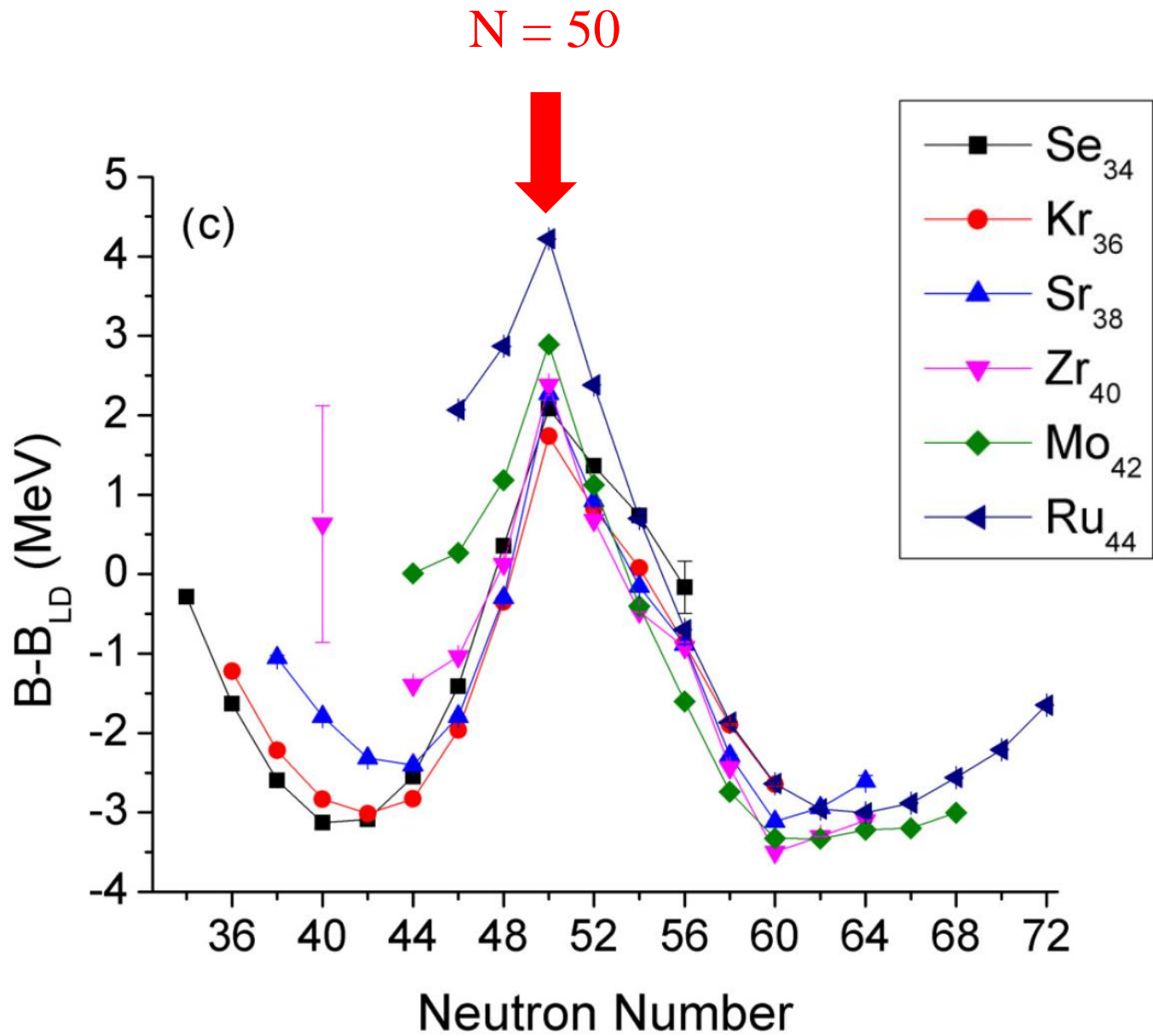
(Bethe-Weizacker 質量公式: 液滴模型)

$$B(N, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{\text{sym}} \frac{(N - Z)^2}{A}$$

どのくらい実験を再現するか？

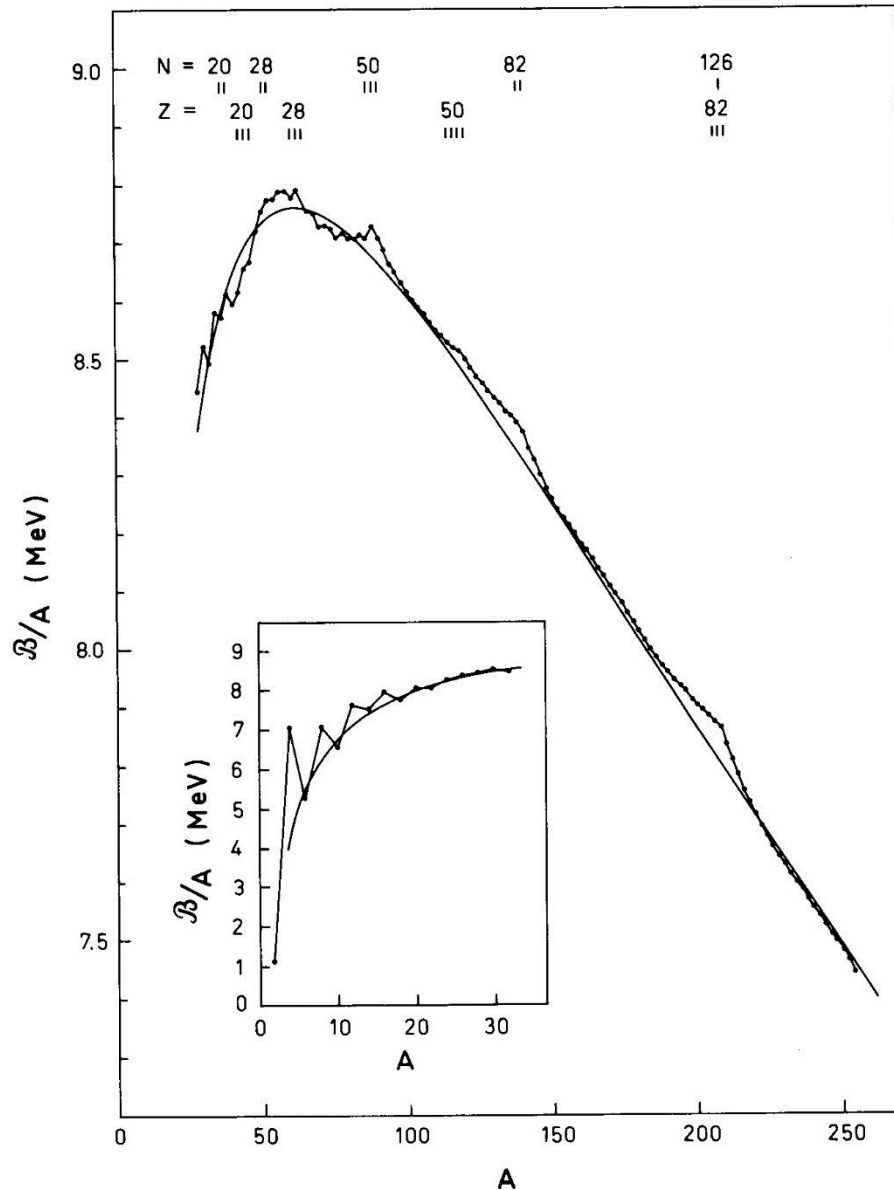


cf. $N, Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$ (魔法数) に対して束縛エネルギー大



殻構造

$$B(N, Z) = B_{\text{macro}}(N, Z) + B_{\text{micro}}(N, Z)$$



• スムーズな関数

$$B_{\text{macro}}(N, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{\text{sym}} \frac{(N - Z)^2}{A}$$

• ゆらぎ (2つの起源)

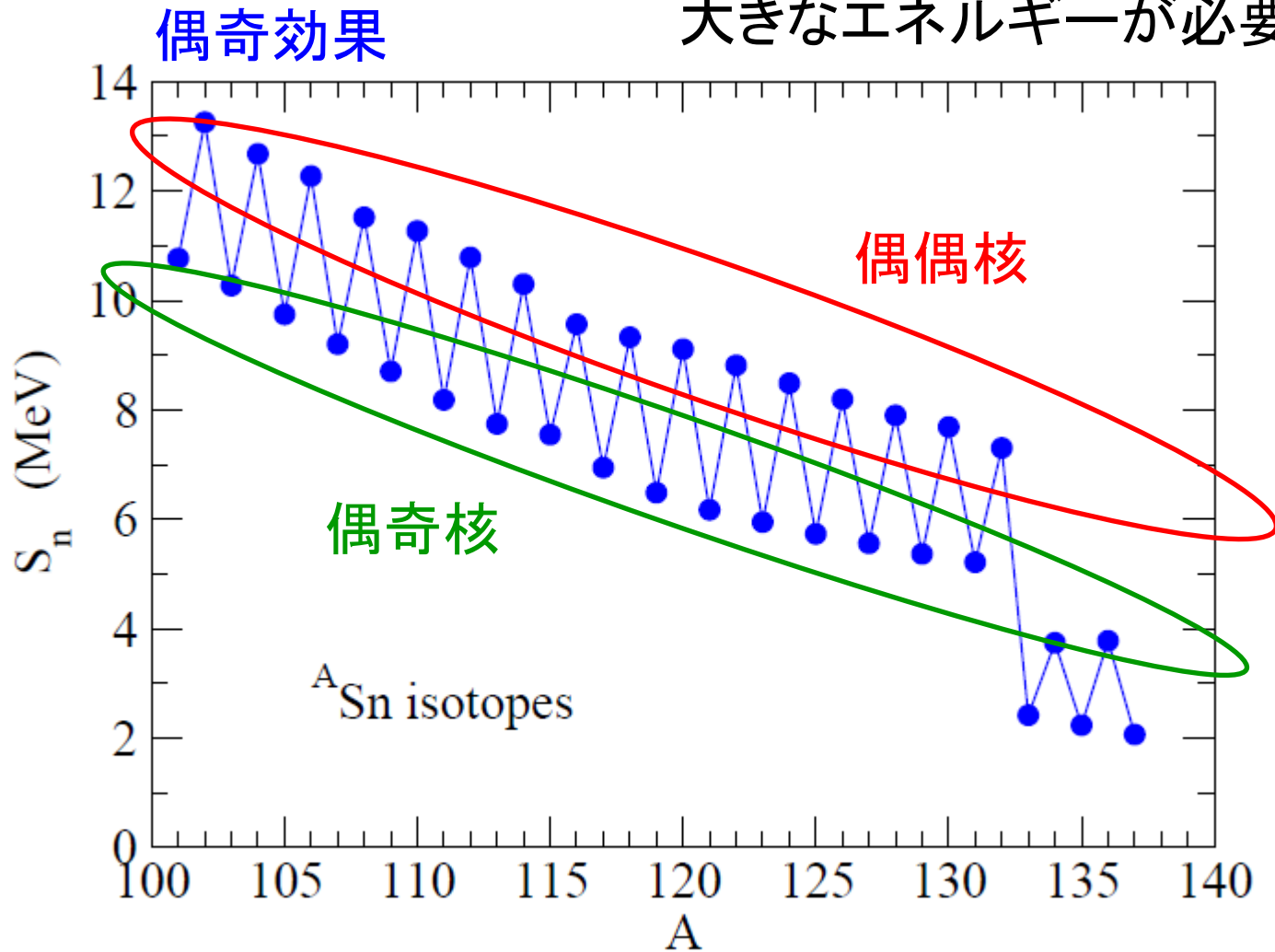
$$B_{\text{micro}} = B_{\text{pair}} + B_{\text{shell}}$$

液滴模型:

$$B_{\text{LDM}} = B_{\text{macro}} + B_{\text{pair}}$$

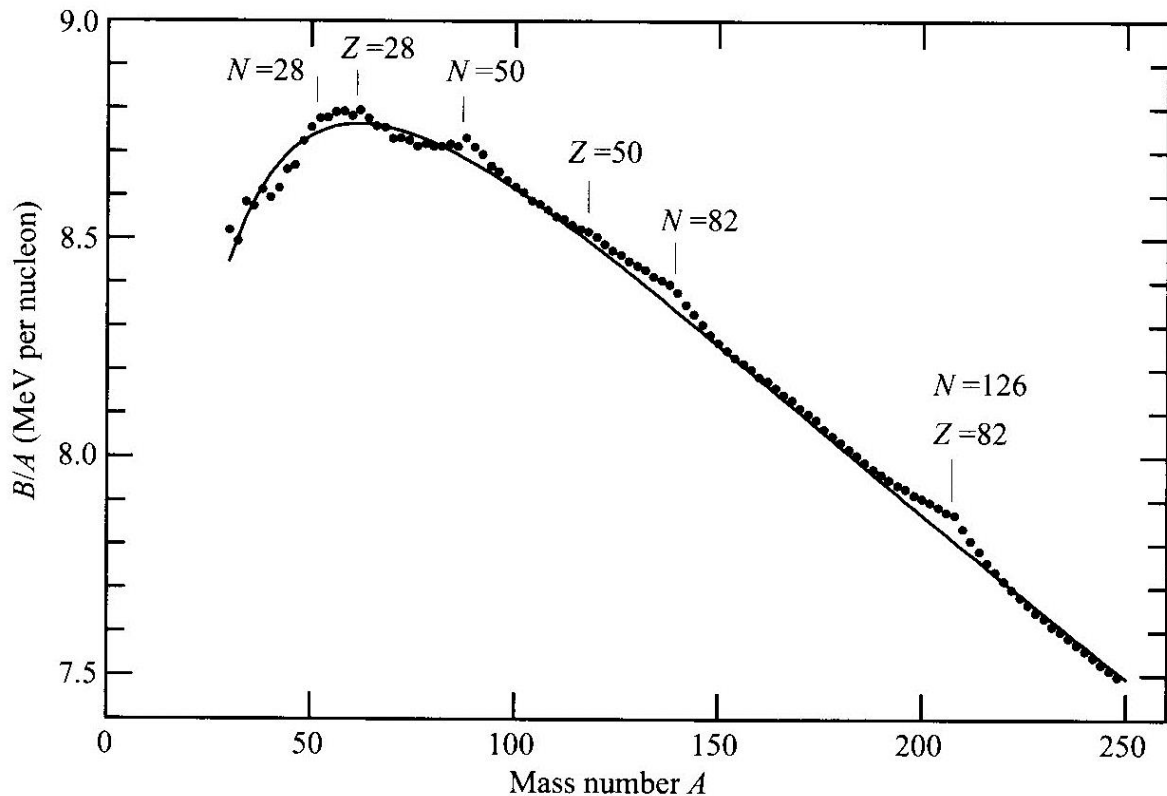
対相関エネルギー

偶数個の中性子から1つ中性子
を取る方が奇数個から取るより
大きなエネルギーが必要: 対相関



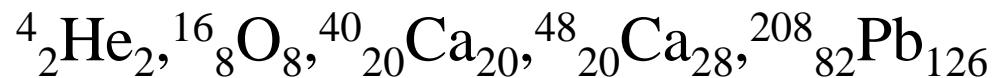
1n separation energy: $S_n (A,Z) = B(A,Z) - B(A-1,Z)$

殻エネルギー



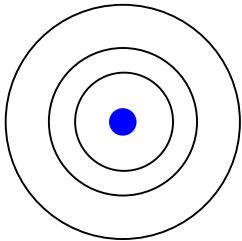
$N, Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$ (魔法数)に対して束縛エネルギー大

⇒ とても安定



(note) 原子の魔法数 (貴ガス)

He (Z=2), Ne (Z=10), Ar (Z=18), Kr (Z=36), Xe (Z=54), Rn (Z=86)

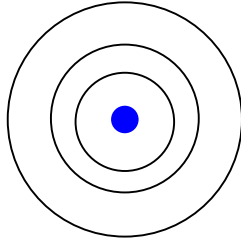


殻構造



(note) 原子の魔法数 (貴ガス)

He (Z=2), Ne (Z=10), Ar (Z=18), Kr (Z=36), Xe (Z=54), Rn (Z=86)

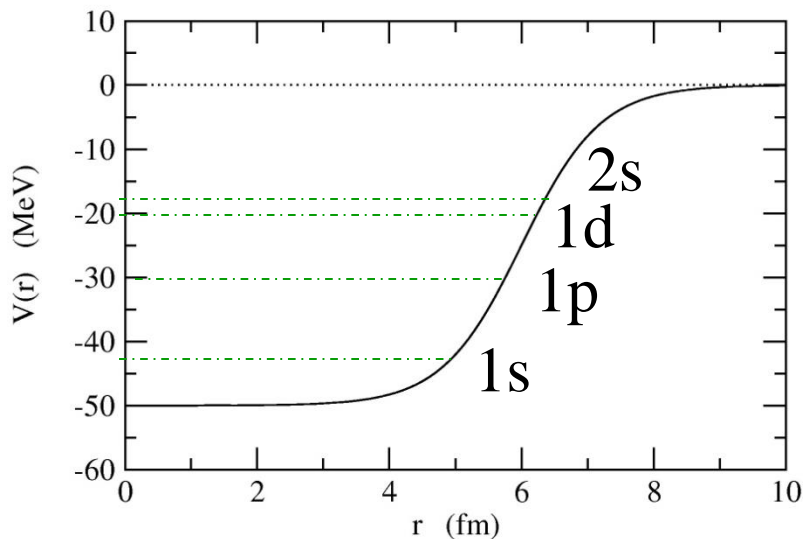


殻構造

原子核物理における似た試み: ポテンシャル中の独立粒子運動

Woods-Saxon ポテンシャル

$$V(r) = -V_0/[1 + \exp((r - R_0)/a)]$$



$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) - \epsilon \right] \psi(\mathbf{r}) = 0$$

$$\psi(\mathbf{r}) = \frac{u_l(r)}{r} Y_{lm}(\hat{\mathbf{r}}) \cdot \chi_{m_s}$$

彦坂忠義

世界に先駆けて原子核の殻模型を提唱
原子力に関する先駆的な研究（原子炉の彦坂模型の提案）



写真提供：彦坂工務店

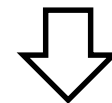
あまりにも研究の時期が「早すぎた」ため
偉大な業績が歴史に埋もれてしまった悲運の科学者 *Hidesaburo Hiyama*

- 1902 愛知県瀬戸郡（現豊橋市）に生まれる *1902-1989*
- 1920 旧制第二高等学校（仙台）入学
- 1926 東北帝国大学理学部物理学科卒業
東北帝国大学助手
- 1934 原子核の殻模型の提唱
- 1939 旧制山口高等学校教授
- 1941 大阪大学秦池正士研究室に内地留学
- 1943 旧制第二高等学校教授
- 1944 原子核の彦坂模型の提案
- 1945 旅順工科大学教授
- 1949 岩手大学教授
- 1951 新潟大学理学部教授
- 1968 東北学院大学教授（～1977）
- 1989 薨去

彦坂忠義(1902 – 1989)

1934 年

殻模型の考えに基づき
計算を行う

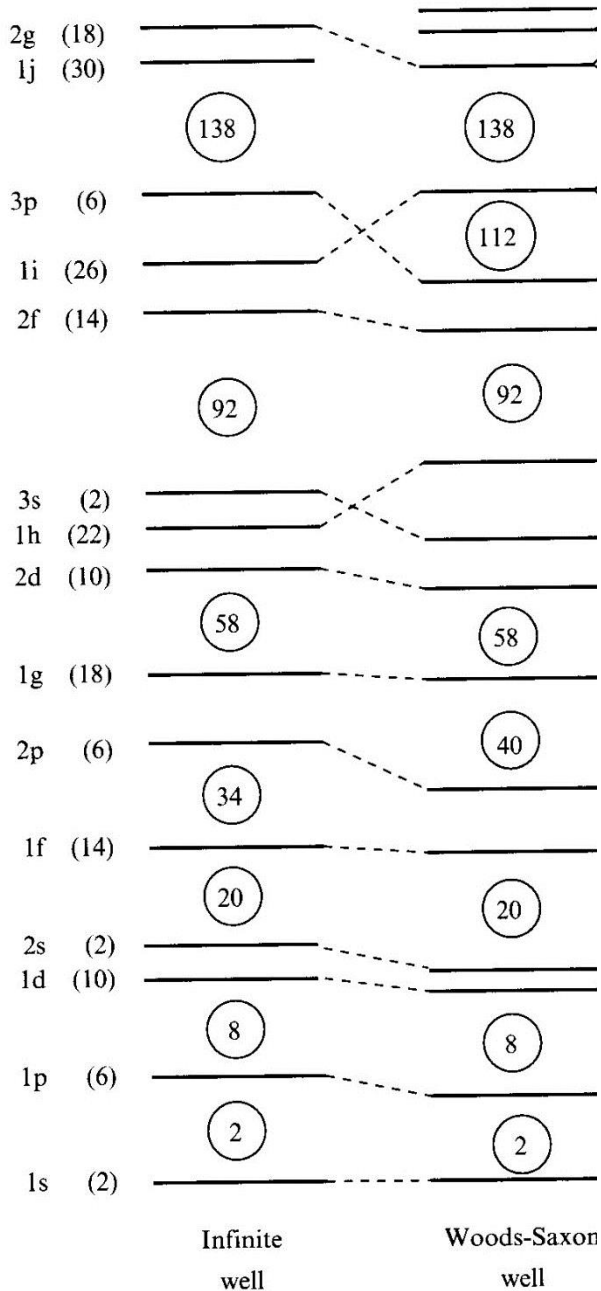


中性子の分離エネルギー、
原子核の安定領域、
磁気モーメント

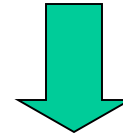
など当時測定されていた
実験データをきれいに説明

（ただし、当時、殻模型の
考えは受け入れられなかつた。）

Phys. Rev. に論文を reject をされる。
独語に書き直し、東北大紀要に発表。



Woods-Saxon ポテンシャルのみでは
魔法数 (2,8,20,28,50,82,126)が正しく
出ない。



メイヤーとイェンセン (1949):
強いスピン・軌道力

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) + V_{ls}(r) \mathbf{l} \cdot \mathbf{s} - \epsilon \right] \psi(\mathbf{r}) = 0$$

$$V_{ls}(r) \sim -\lambda \frac{1}{r} \frac{dV}{dr} \quad (\lambda > 0)$$

Infinite
well

Woods-Saxon
well



「お母さん、ノーベル賞を
もらおう」
シャロン・バーチ著

- 1 **マリー・スクロドフスカ・キュリー**
(1903:ノーベル物理学賞。放射能の研究
／1911:ノーベル化学賞。ラジウムの発見)
- 2 **リーゼ・マイトナー**
(核分裂を発見しながら1944年のノーベル化学賞
をハーンに独り占めにされる)
- 3 **エミー・ネーター**
(ノーベル賞に数学賞があればまちがいなく受賞
に値した抽象代数学の天才)
- 7 **マリア・ゲッペルト・メイヤー**
(1963:ノーベル物理学賞。原子核の殻模型の研究)
- 10 **呉健雄**
(パリティ非保存の実験的検証をしたが、1957年の
ノーベル物理学賞は李政道と楊振寧に)
- 14 **ジョスリン・ベル・バーネル**
(パルサーを発見したが、1974年の物理学賞は
彼女の上司ヒューイッシュに)

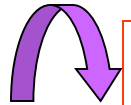
jj 結合殻模型

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) - \epsilon \right] \psi(\mathbf{r}) = 0 \quad \Longrightarrow \quad \psi_{lm m_s}(\mathbf{r}) = \frac{u_l(r)}{r} Y_{lm}(\hat{\mathbf{r}}) \cdot \chi_{m_s}$$

スピン・軌道力

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) + V_{ls}(r) \mathbf{l} \cdot \mathbf{s} - \epsilon \right] \psi(\mathbf{r}) = 0$$

$$\text{(note) } \mathbf{j} = \mathbf{l} + \mathbf{s} \quad \Longrightarrow \quad \mathbf{l} \cdot \mathbf{s} = (j^2 - l^2 - s^2)/2$$



$$\psi_{jlm}(\mathbf{r}) = \frac{u_{jl}(r)}{r} \mathcal{Y}_{jlm}(\hat{\mathbf{r}})$$

$$\mathcal{Y}_{jlm}(\hat{\mathbf{r}}) = \sum_{m_l, m_s} \langle l \ m_l \ 1/2 \ m_s | j \ m \rangle Y_{lm_l}(\hat{\mathbf{r}}) \chi_{m_s}$$

jj 結合殻模型

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) + V_{ls}(r) \mathbf{l} \cdot \mathbf{s} - \epsilon \right] \psi(\mathbf{r}) = 0$$

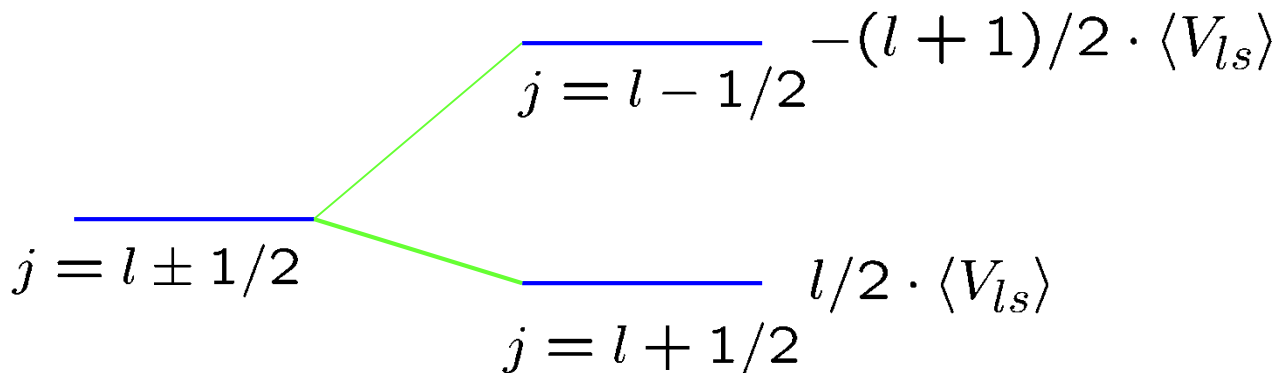
(note) $j = l + s \implies \mathbf{l} \cdot \mathbf{s} = (j^2 - l^2 - s^2)/2$

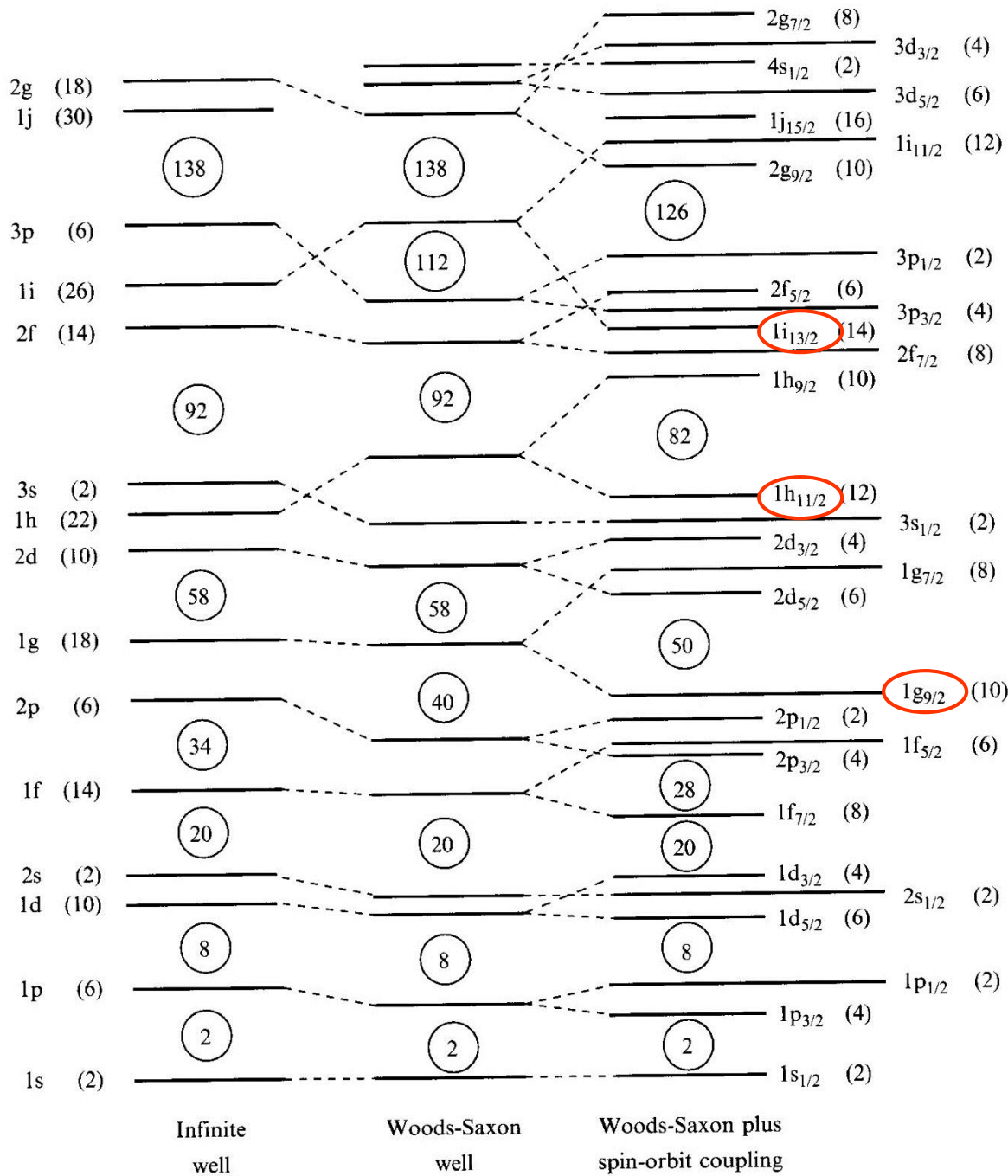


$$\psi_{jlm}(\mathbf{r}) = \frac{u_{jl}(r)}{r} \mathcal{Y}_{jlm}(\hat{\mathbf{r}})$$

$$\mathcal{Y}_{jlm}(\hat{\mathbf{r}}) = \sum_{m_l, m_s} \langle l \ m_l \ 1/2 \ m_s | j \ m \rangle Y_{lm_l}(\hat{\mathbf{r}}) \chi_{m_s}$$

$$\mathbf{l} \cdot \mathbf{s} = l/2 \ (j = l + 1/2), \quad -(l + 1)/2 \ (j = l - 1/2)$$





intruder 状態
unique parity 状態

一粒子準位

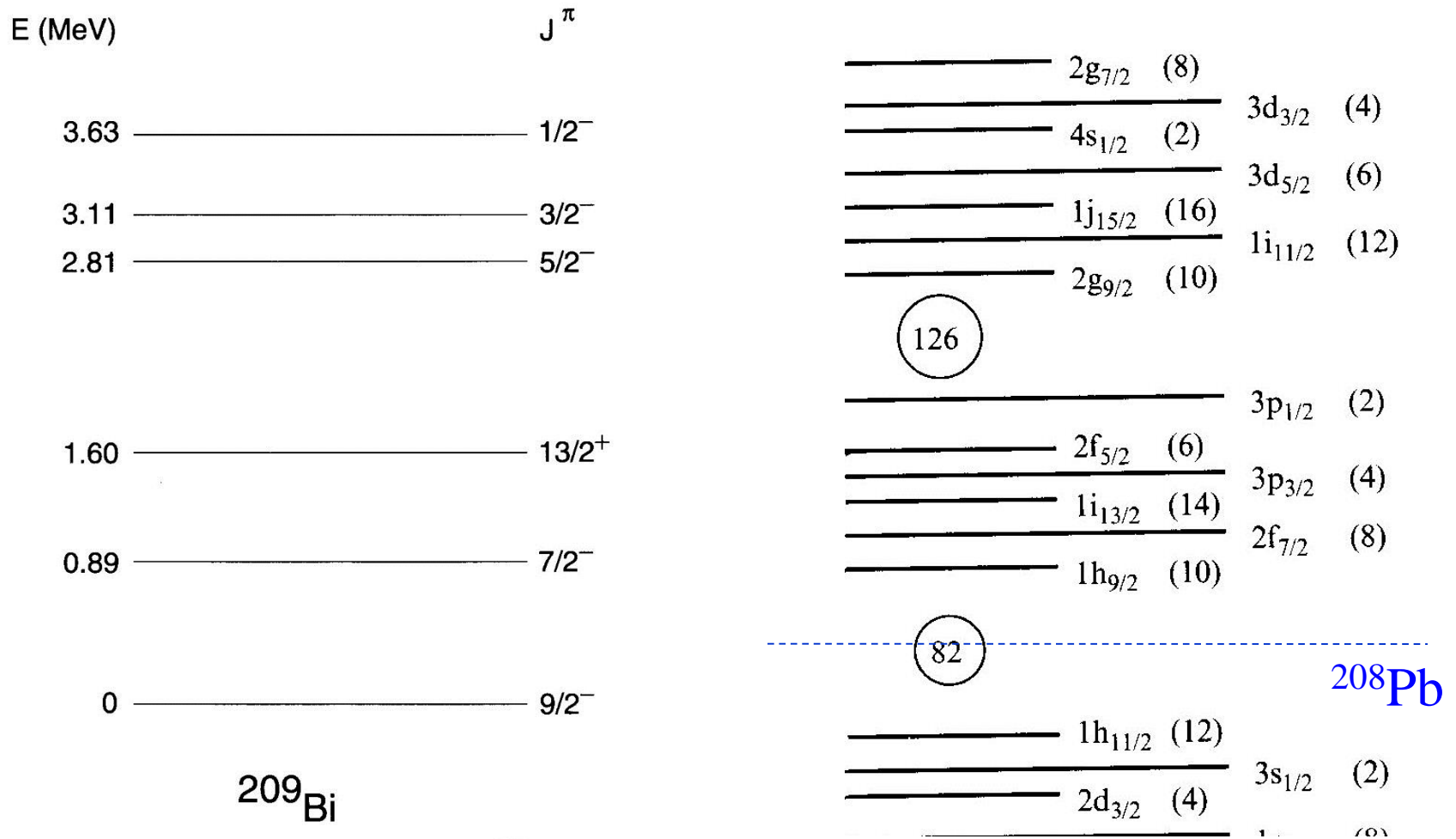
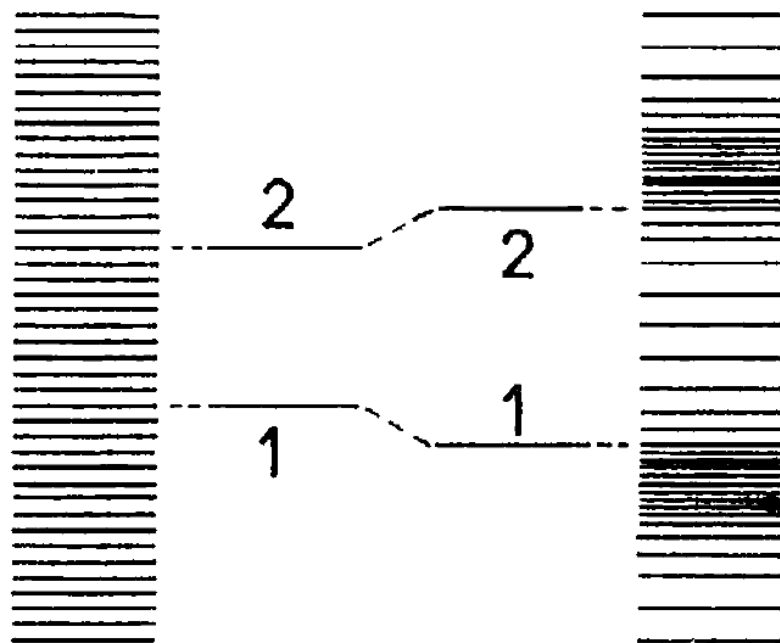


FIG. 3.6. Low-lying single-particle levels of ^{209}Bi .

何故、閉殻の原子核は安定になるのか？

準位密度



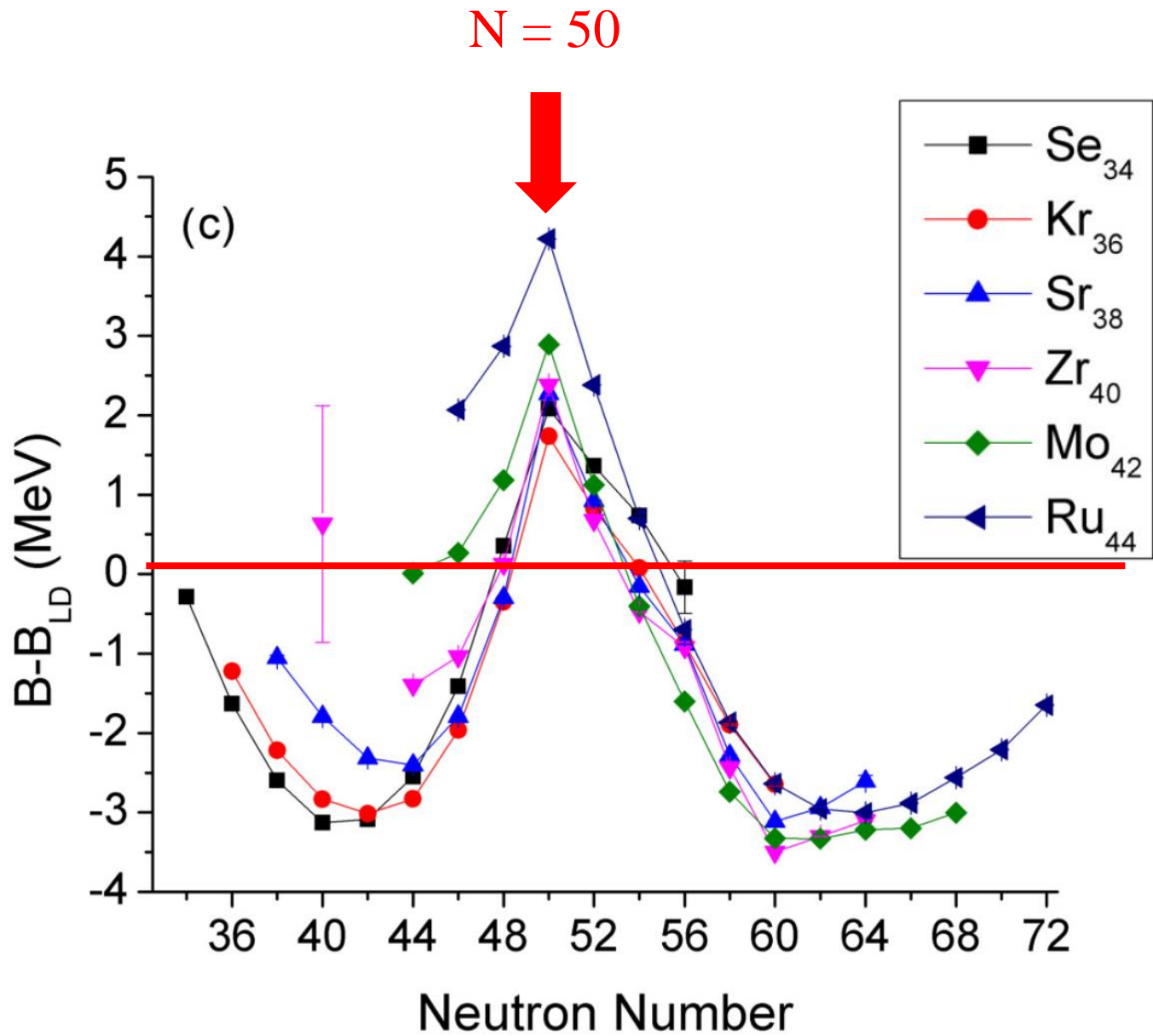
(a)

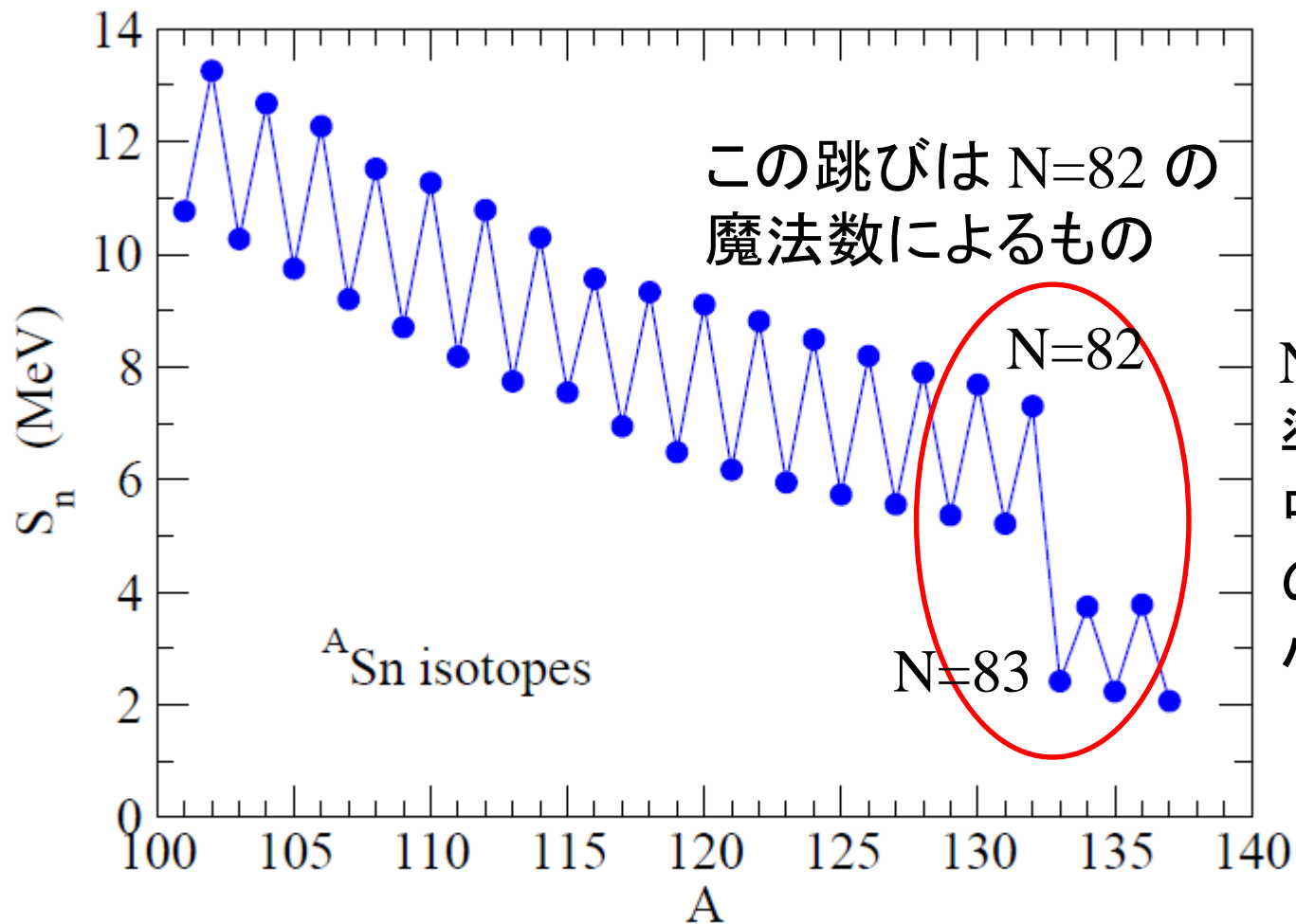
(b)

均一の場合

濃淡がある場合

準位密度に濃淡があれば、下から数えて濃淡の終わりまで準位が
つまると(図の1の場合)、均一の場合に比べてエネルギーが小さい

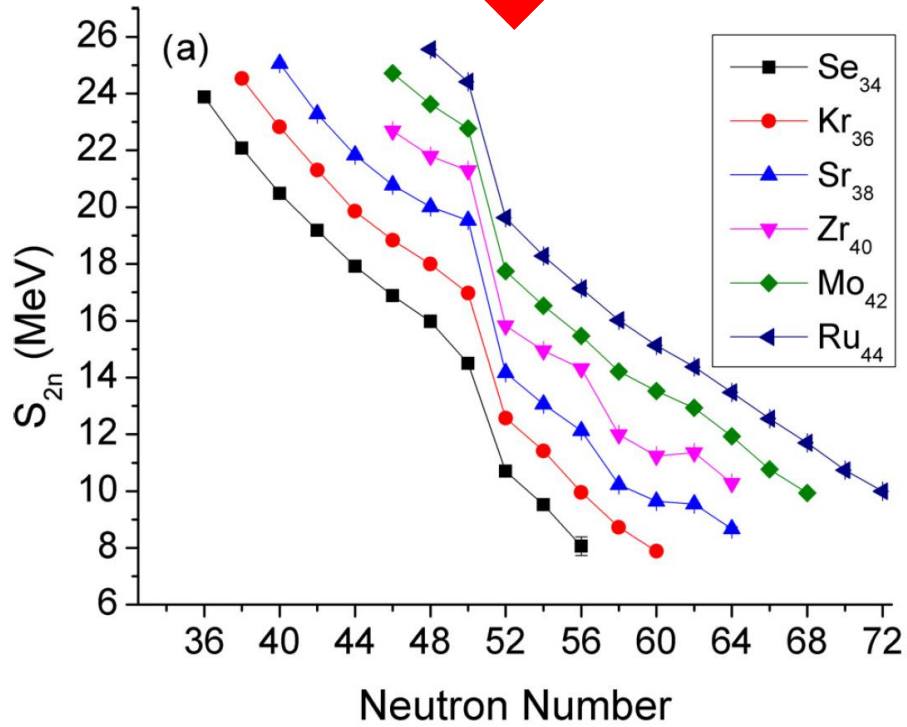




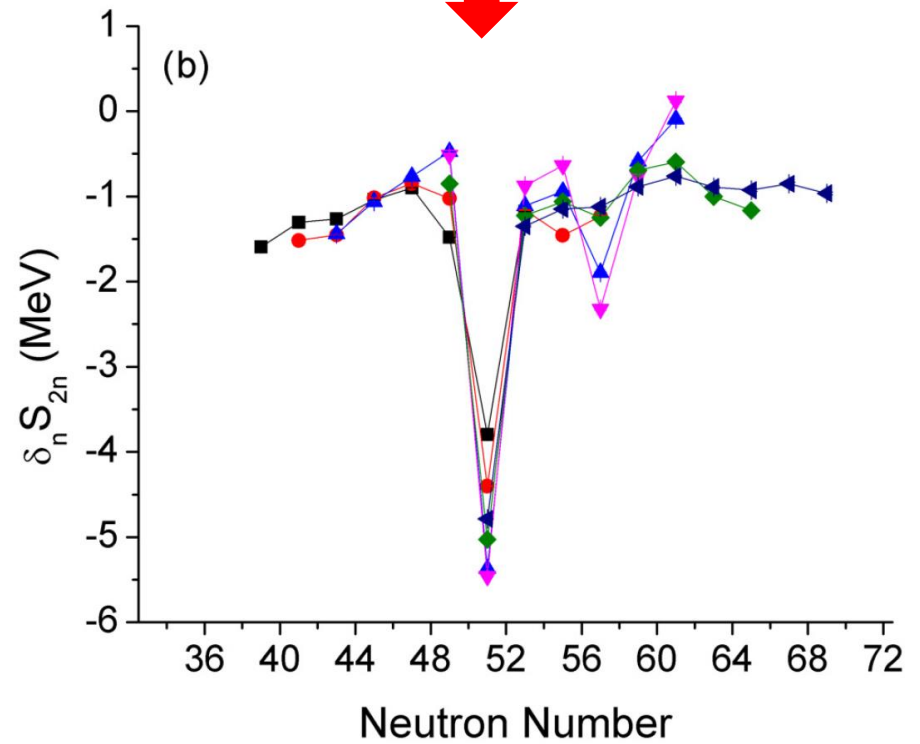
N=83から上の準位がつまるため中性子をとりのぞくのにエネルギーが小さくてすむ

1n separation energy: $S_n(A,Z) = B(A,Z) - B(A-1,Z)$

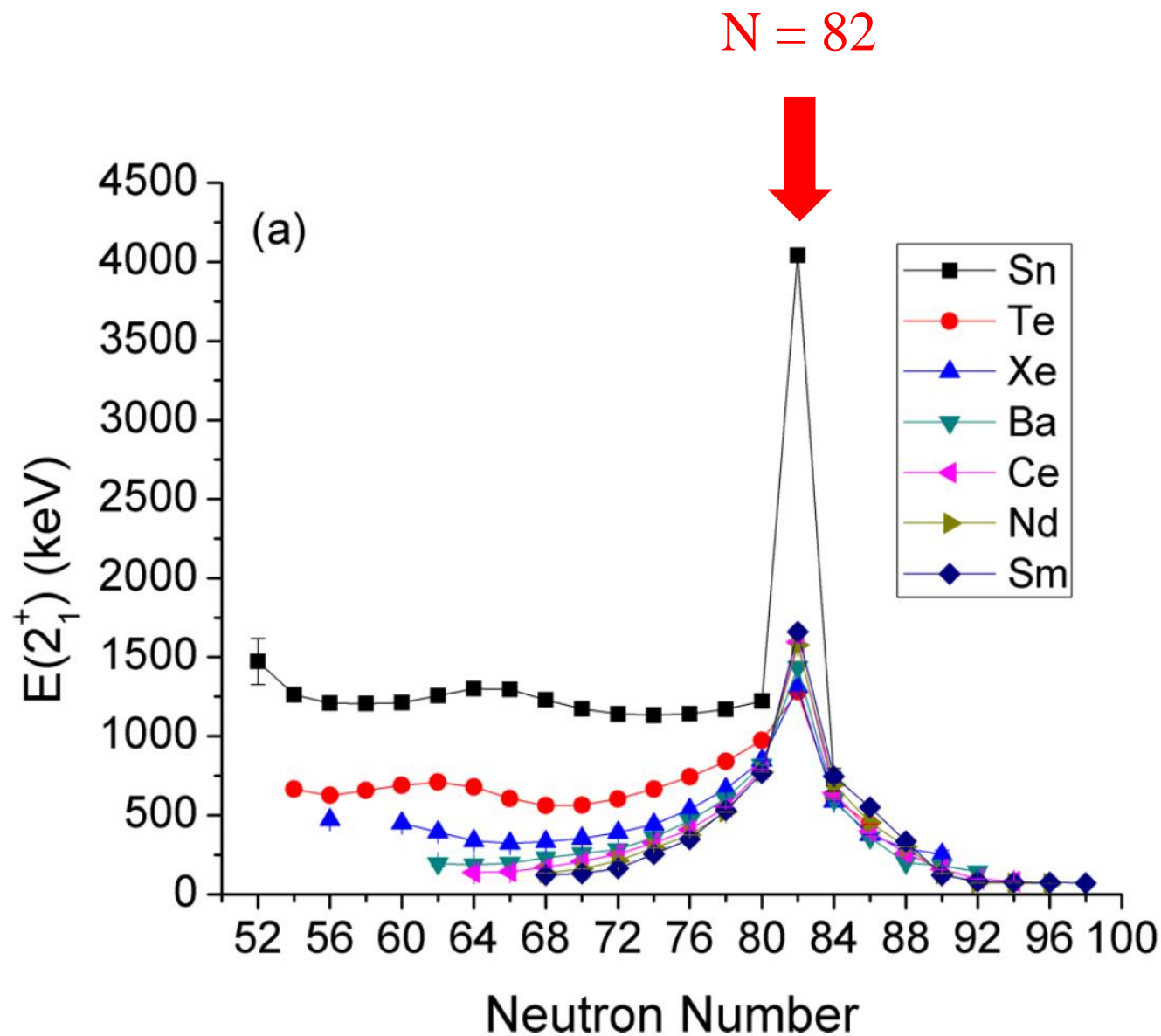
$N = 50$



$N = 50$



他の証拠：第一励起状態の励起エネルギー



元素合成と魔法数

元素はどのように出来たのか？

→ 宇宙で生まれた

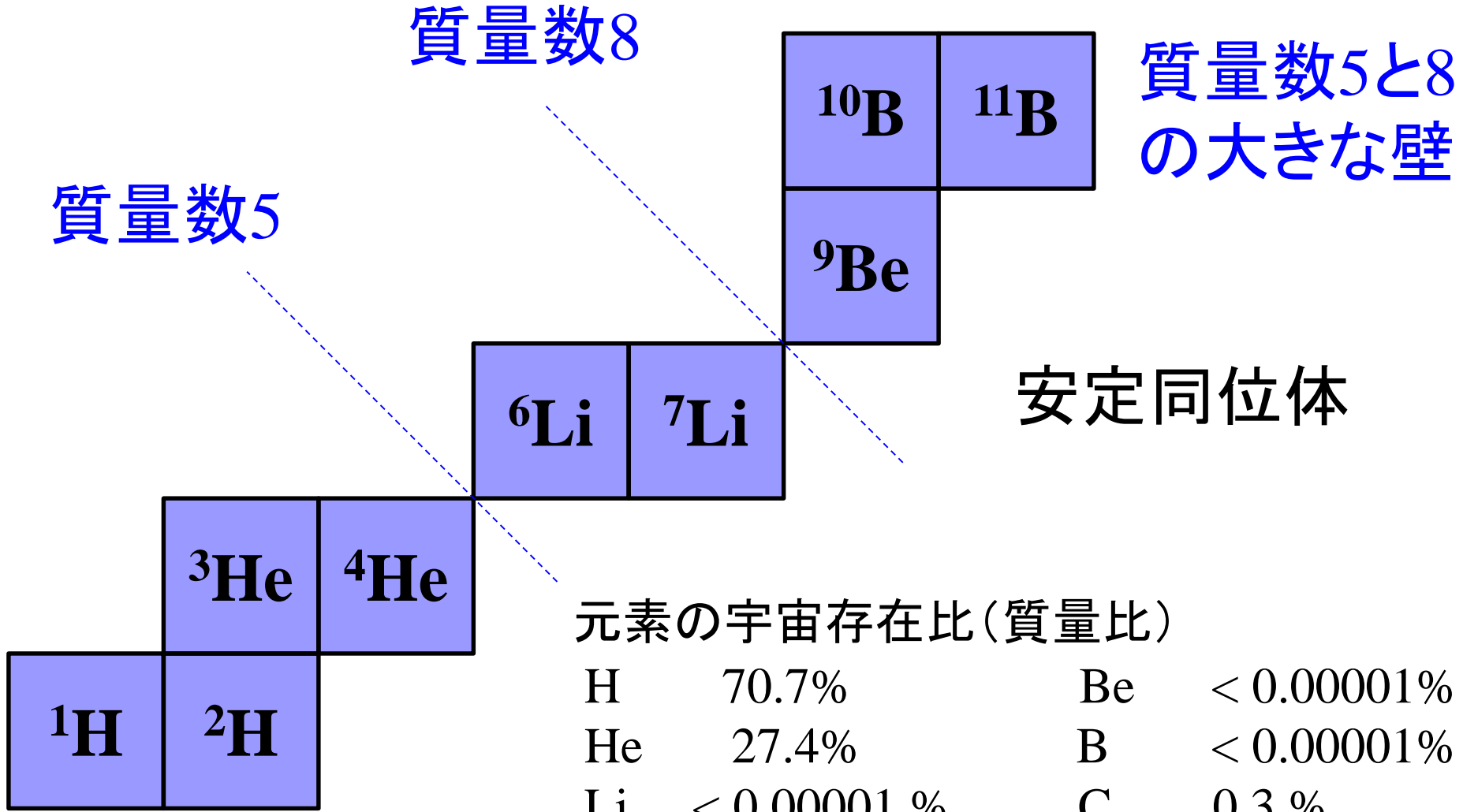


ビッグバン
(137億年前)



Li

Liがほんの少ししか
できなかったわけ



元素の宇宙存在比(質量比)

H	70.7%	Be	< 0.00001%
He	27.4%	B	< 0.00001%
Li	< 0.00001 %	C	0.3 %

元素はどのように出来たのか？

→ 宇宙で生まれた



ビッグバン
(137億年前)



Li

元素はどのように出来たのか？

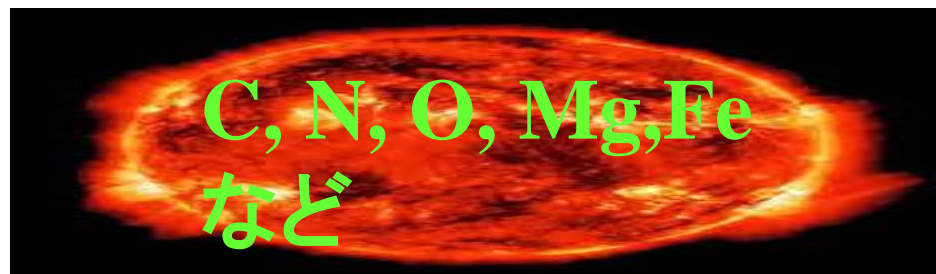
Feまでの元素の起源



(大質量)星の内部での核融合反応
————→ 恒星が光っているもと

元素はどのように出来たのか？

Feまでの元素の起源



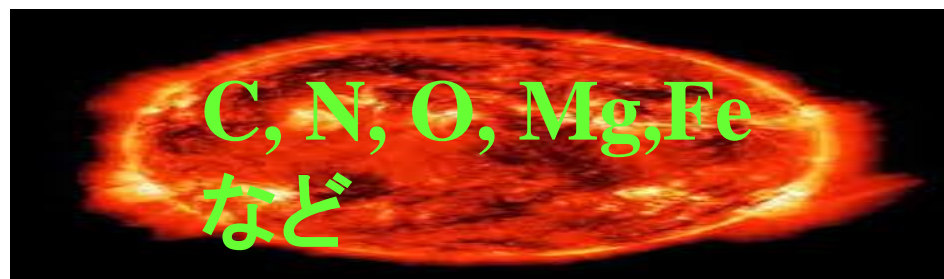
(大質量)星の内部での核融合反応
→ 恒星が光っているもと

- Feまでは発熱反応
- Feから先は吸熱反応

→ 核融合は鉄(Fe)で止まる

鉄より重い元素(例えば鉛など)は
どのように出来たのか？

(ちょっとその前に) 星の一生について

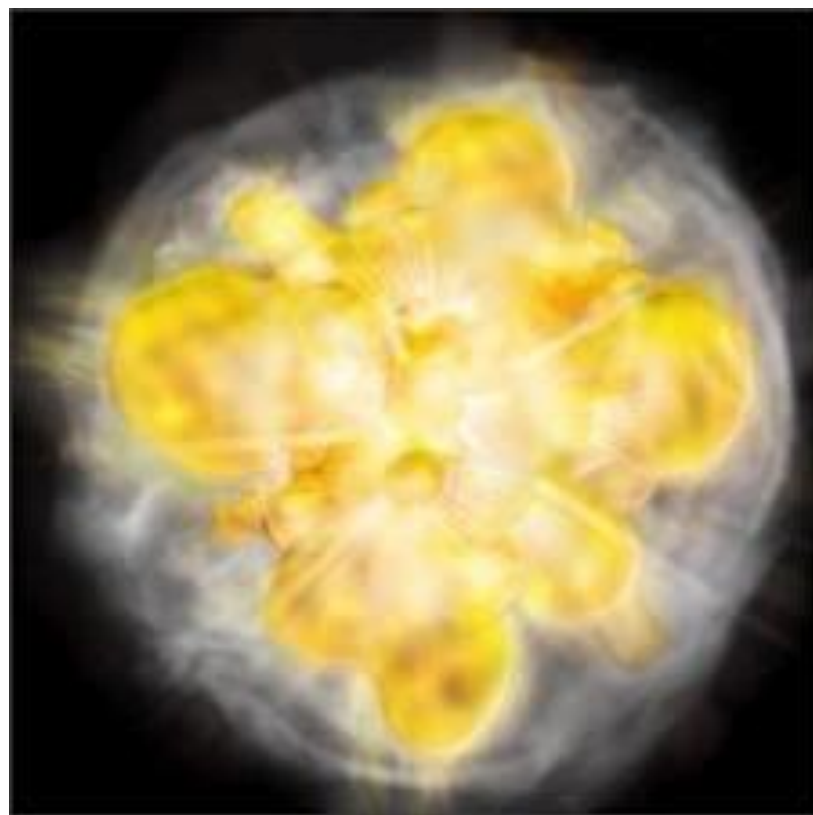


(大質量) 星の内部での核融合反応



核融合の燃料がなくなると

- ✓ 重力により縮む
- ✓ 耐えられなくなると爆発
(超新星爆発)



O

Mg

Ti



N

Ca



H

Fe

C



Li

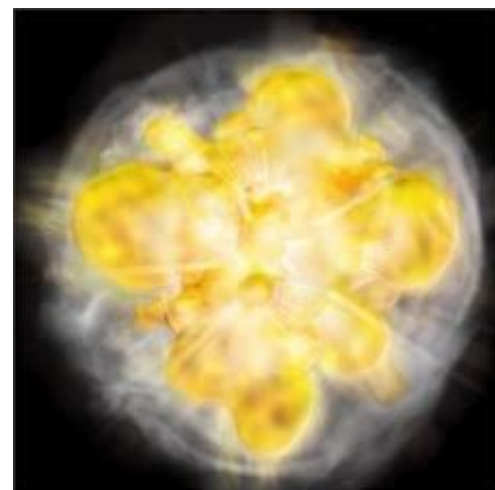
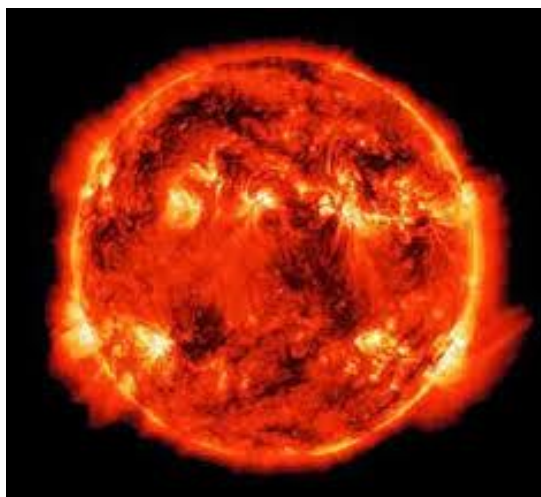
Si



He

超新星爆発により
元素が宇宙空間に
ばらまかれる

サイクルのくりかえし



星間ガス

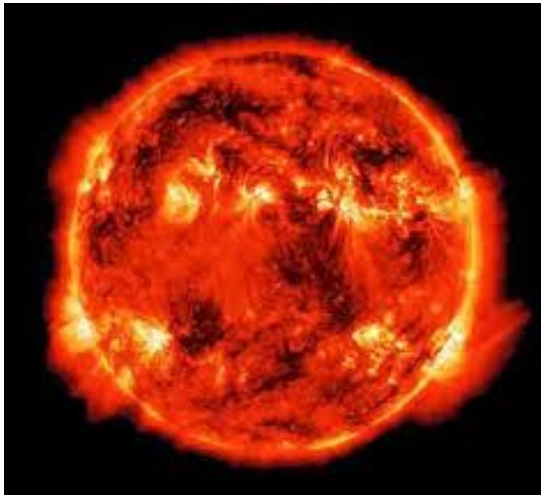
星の形成

超新星爆発



元素はどのように出来たのか？

中性子の吸収

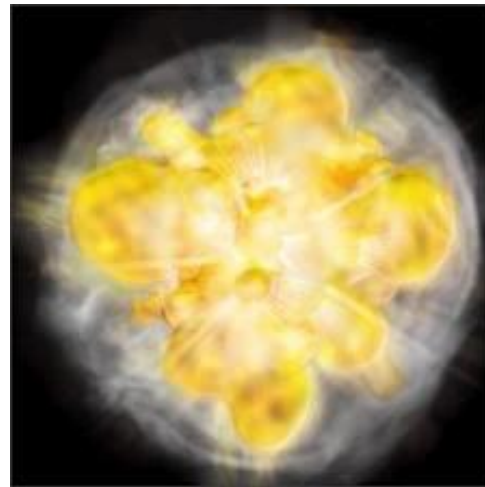


赤色巨星



s-プロセス

Ba, La, Pb, Bi など



超新星爆発



r-プロセス

Th, Eu, U など



* 最近では
中性子星
の合体説も。



金やウランがどうやって出来たのか
は実はあまりよくわかっていない。

元素生成

ビッグバン
137億年前



H, He

最初の星の形成:
誕生から2億年



大質量星の内部

C, N, O, Fe

超新星爆発

Sプロセス
Bi まで



© KAGAYA

~90種類の
重元素蓄積
46億年前



次世代の星の
誕生



C, N, O, Fe,
Si, Au??, U??

超新星残骸から
星間物質へ



© KAGAYA

生命の誕生と進化

生命誕生のための幸運な偶然

原子の魔法数

電子の数が 2, 10, 18, 36, 54, 86

元素の周期表

	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8			
1	H															He			
2	Li	Be														Ne			
3	Na	Mg														Ar			
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	L	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	Fr	Ra	A																
	L	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
	A	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

二重閉殻核

● 典型金属元素
● 半金属元素
● 非金属元素
● 遷移金属元素
● 希ガス

不活性ガス: He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn

原子核の魔法数

陽子または中性子の数が

2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 の時安定

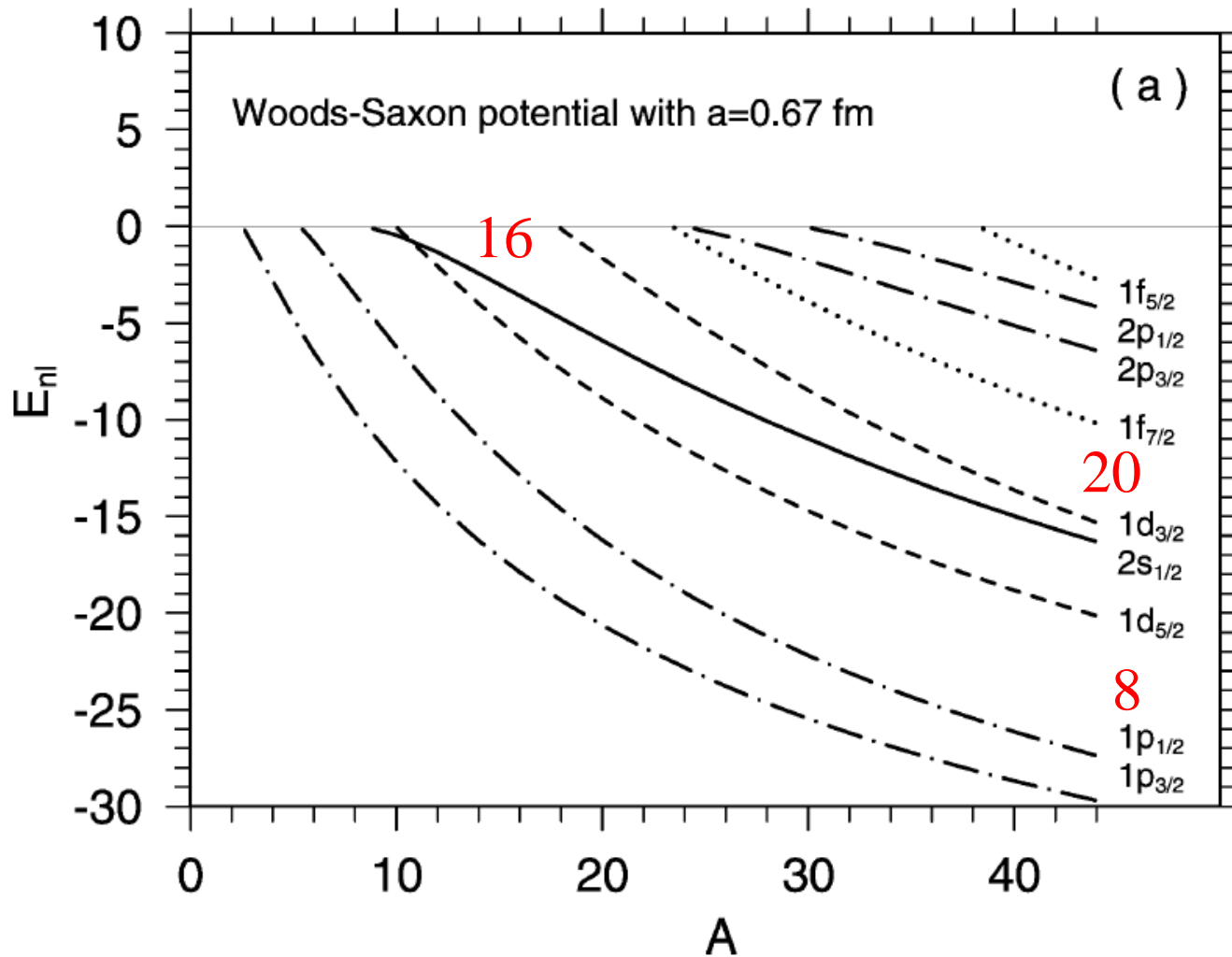
→ 例えば $^{16}_8\text{O}_8$ (二重閉殻核)

→ 酸素元素は元素合成の過程で数多く生成された

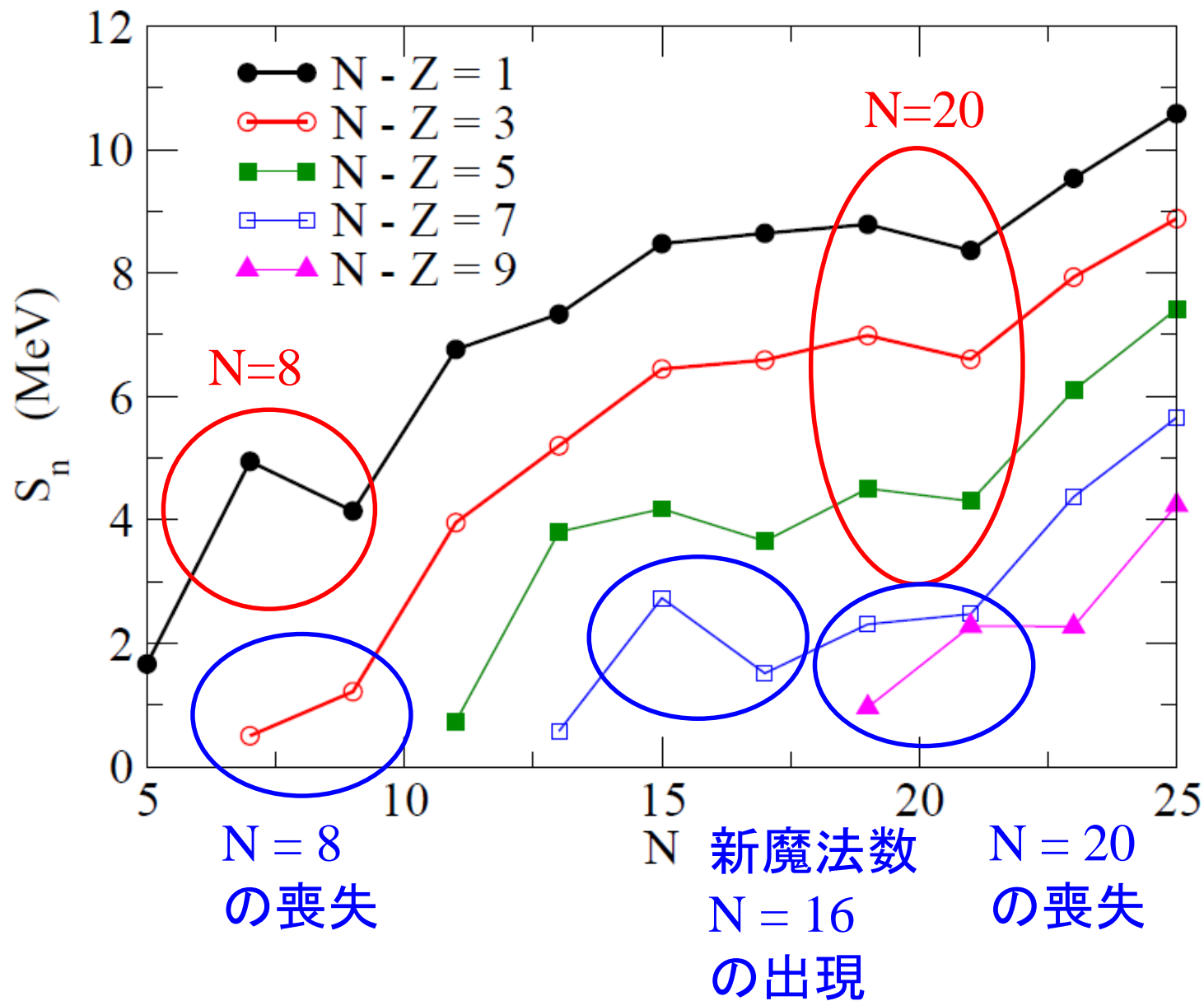
→ しかし、酸素は化学的には「活性」

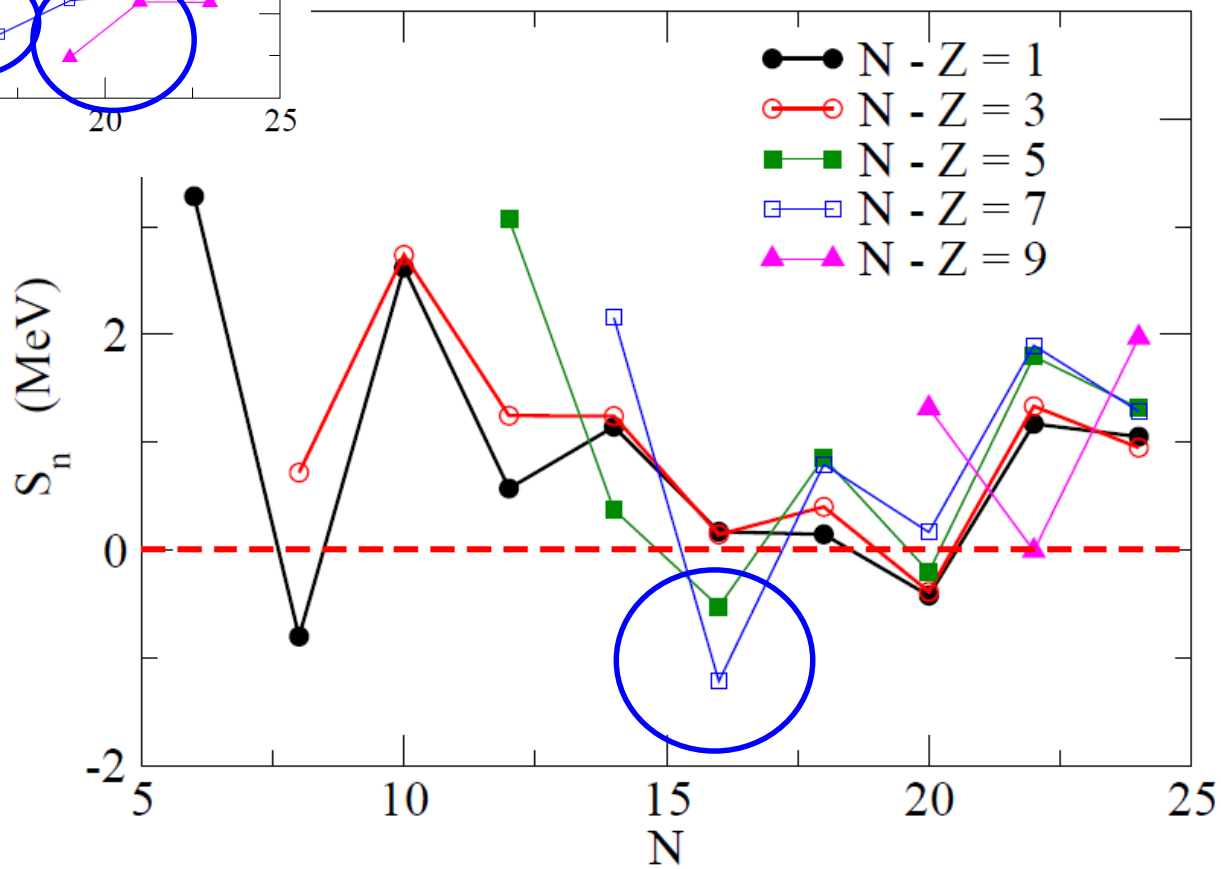
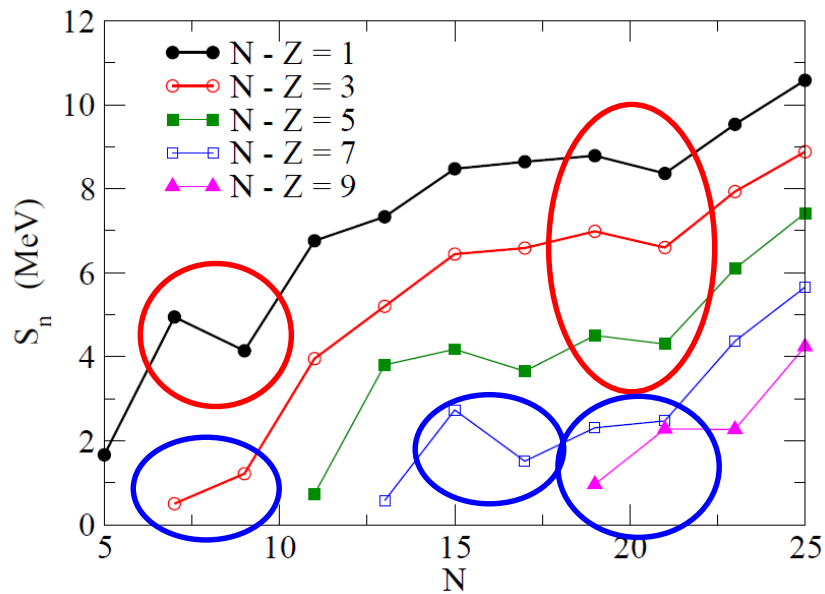
→ 化学反応により様々な複雑な物質をつくり生命に至った

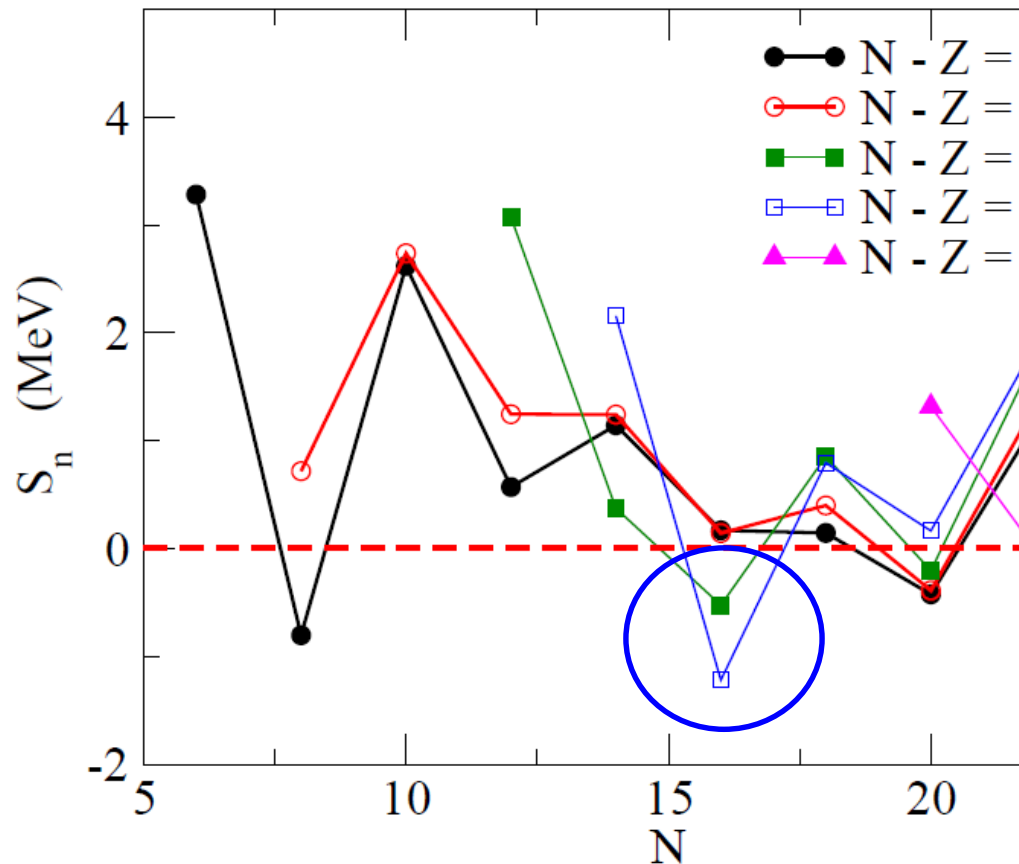
最近の話題: 魔法数は変化する?



実験的な証拠







最近では、
魔法数 $N=20, 28$ の喪失
新魔法数 $N=34$ の出現
なども。

Nature, vol. 502 (2013)
新魔法数 $N=34$ の発見

2016年度前期 物理学の最前線

主催: 東北大学大学院理学研究科物理学専攻

会場: 東北大学理学部物理系講義棟3F

(地下鉄東西線 青葉山駅下車)

<http://www.sci.tohoku.ac.jp/campusmap/kita-aobayama/>

講演時間: 17:00-18:00 一般来聴歓迎(無料)



7月15日(金)



櫻井 博儀 氏

東京大学 理学系研究科
教授
理化学研究所
主任研究員

変わる原子核の魔法数

原子核には原子と同様に殻構造があり、これを反映して魔法数が存在する。最近の研究から、魔法数は固定された数ではなく、中性子過剰な領域では従来の魔法数が喪失したり、新魔法数が出現することがわかってきた。このような魔法数の変化は、宇宙での元素合成シナリオにも大きな影響をあたえる。本講演では、理化学研究所「RIビームファクトリー」で行われている魔法数の世界最先端研究を紹介し、将来の方向についても議論する。