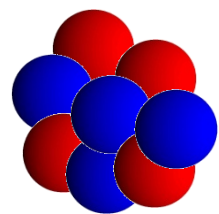
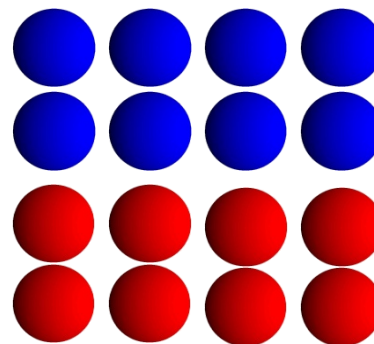


# 原子核の質量



$$8p + 8n$$

$B$   
(束縛エネルギー)

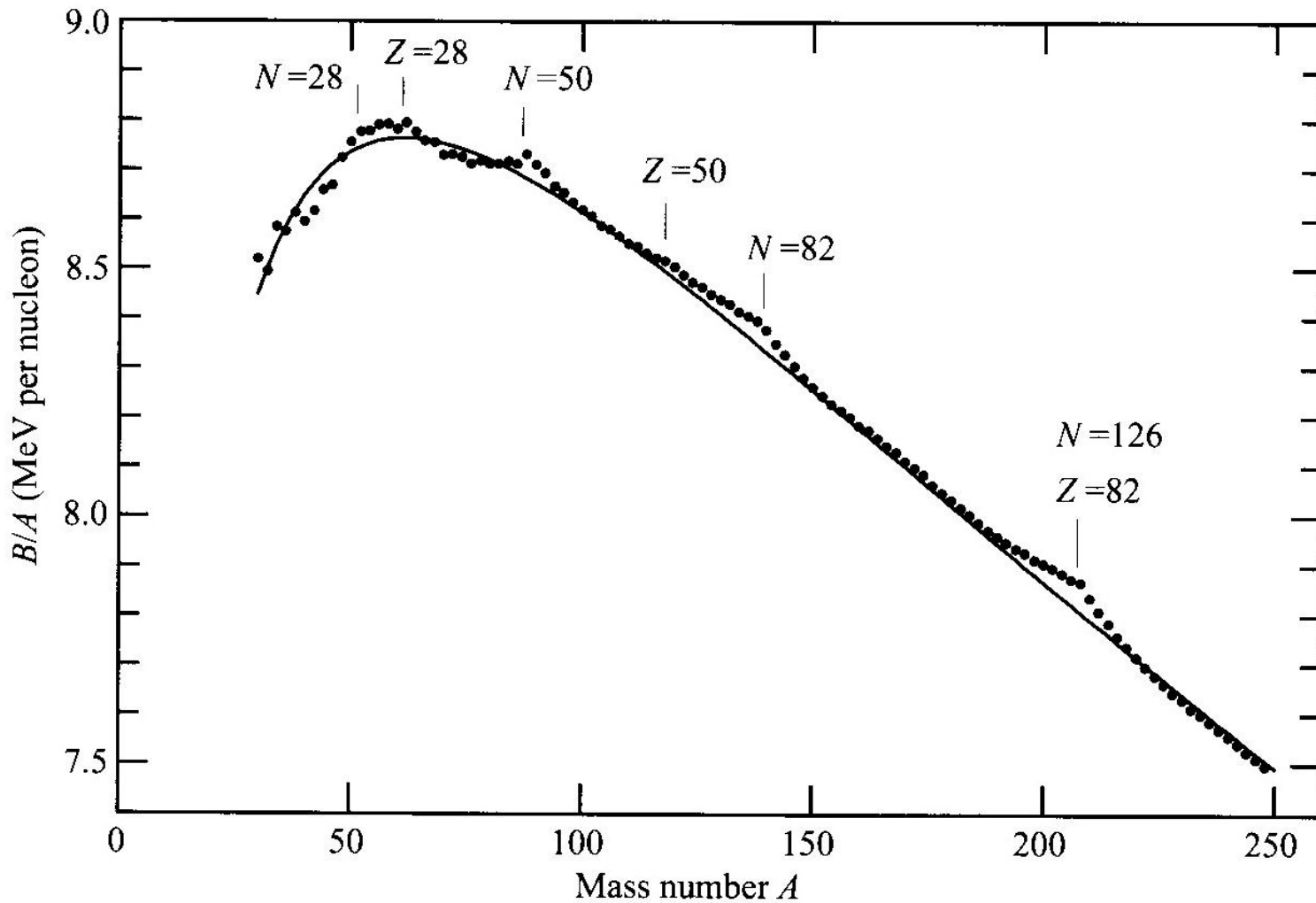


$$m(N, Z)c^2 = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - B$$

(Bethe-Weizacker 質量公式: 液滴模型)

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

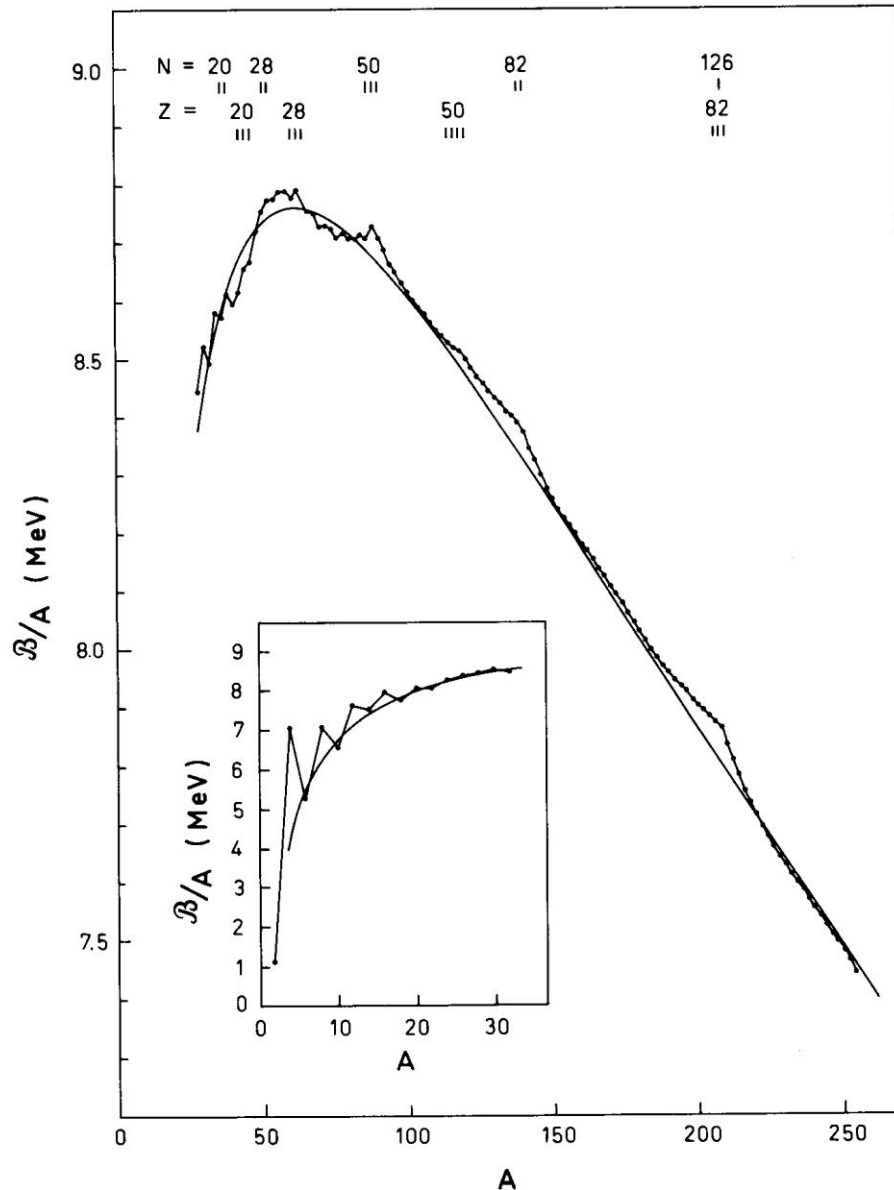
# どのくらい実験を再現するか？



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

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

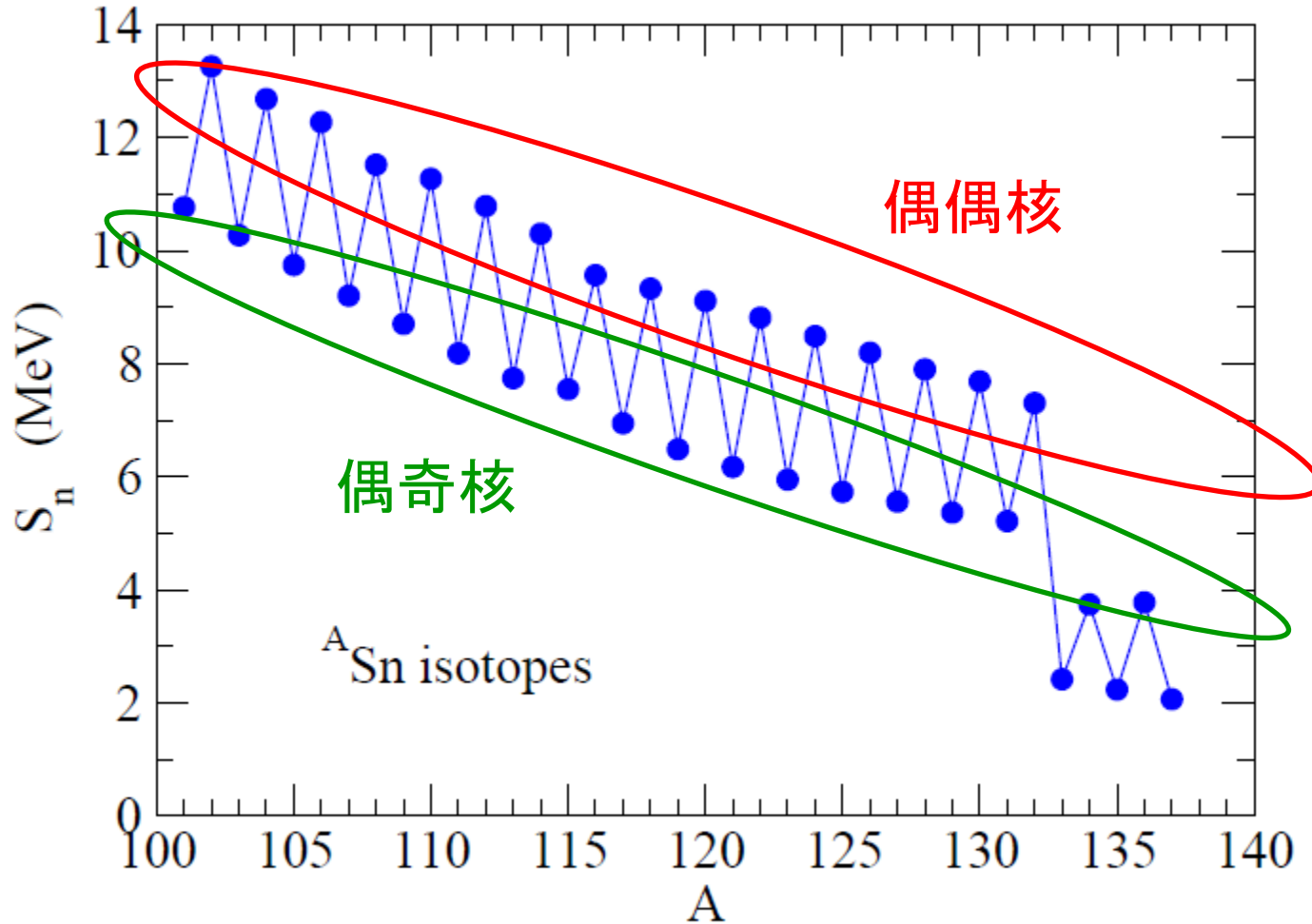
## 液滴模型:

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

# 対相関エネルギー

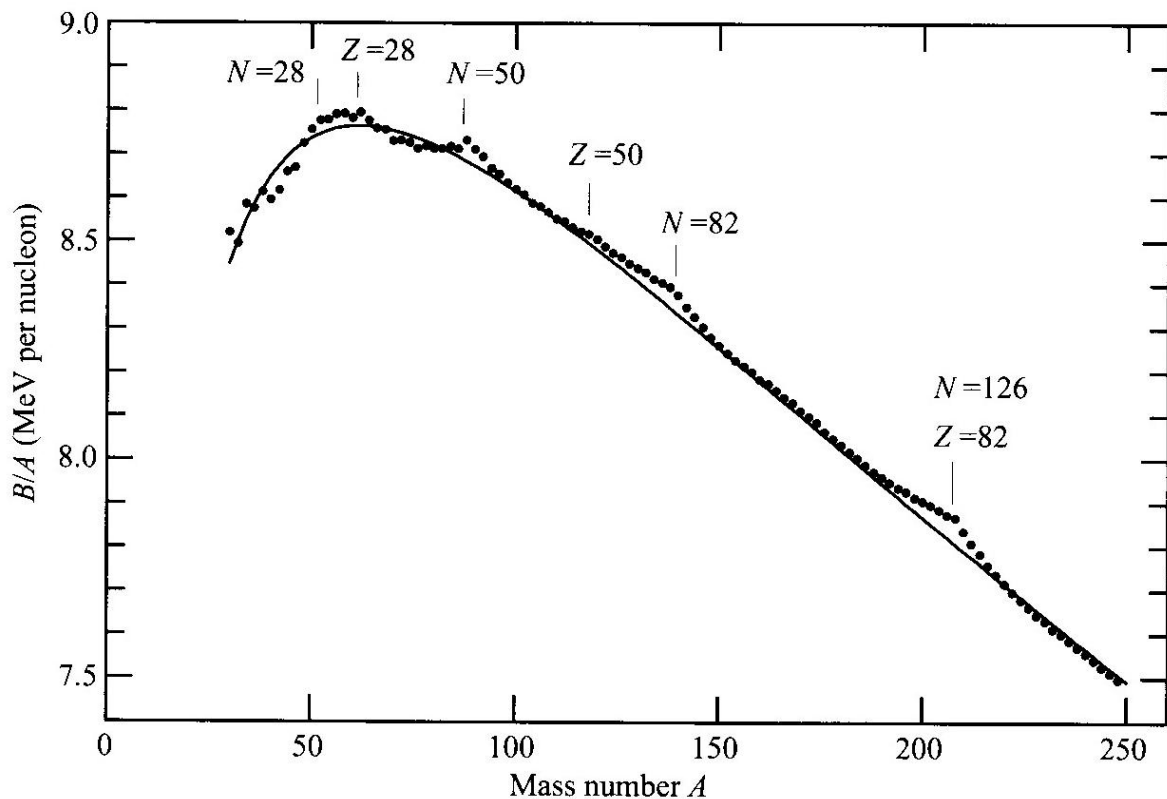
偶数個の中性子から1つ中性子  
を取る方が奇数個から取るより  
大きなエネルギーが必要: 対相関

even-odd staggering



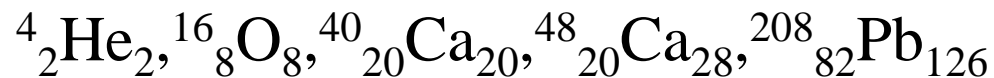
1n separation energy:  $S_n (A,Z) = B(A,Z) - B(A-1,Z)$

# 殻エネルギー



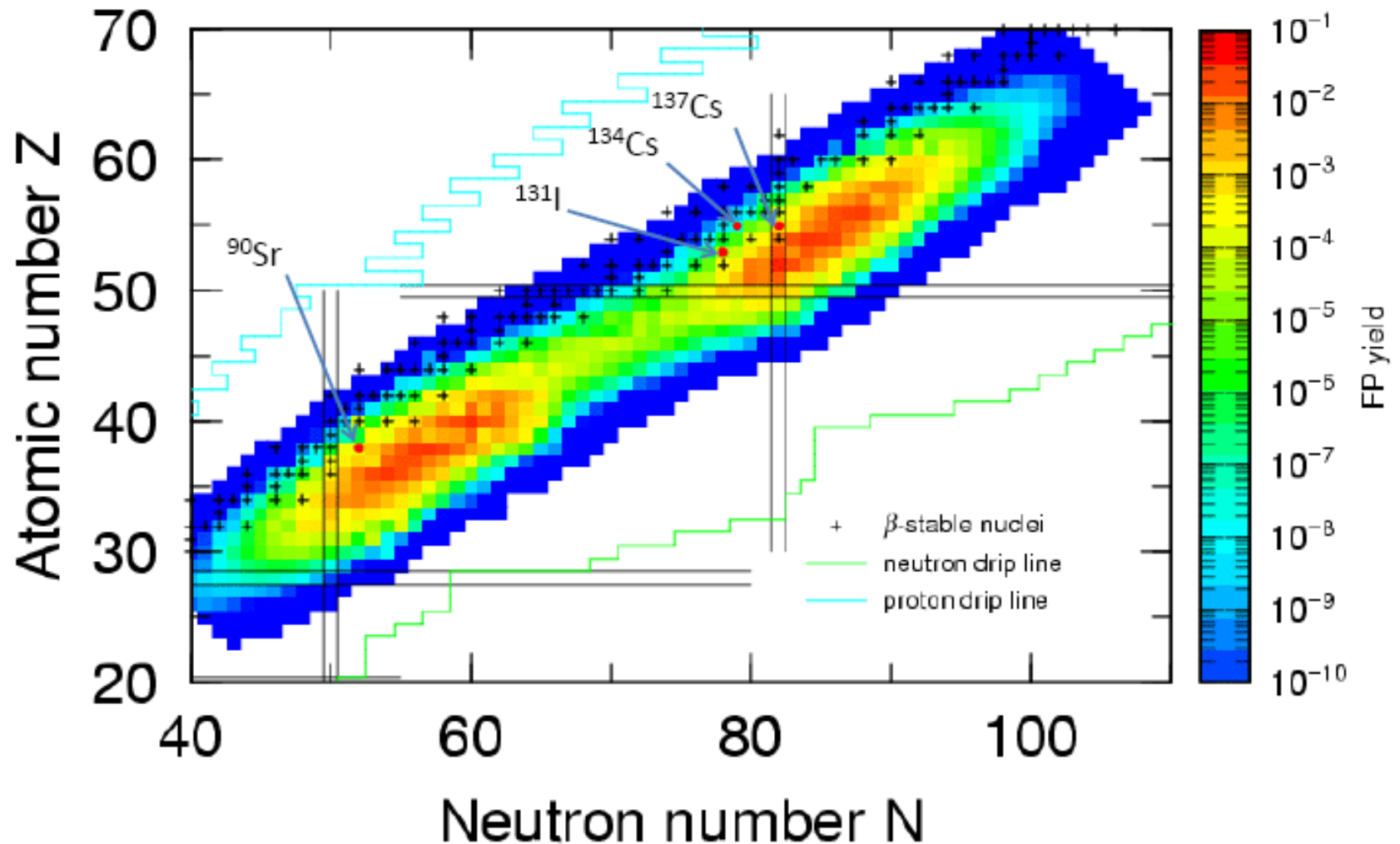
$N, Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$  (魔法数)に対して束縛エネルギー大

⇒ とても安定



# Fission fragment mass distribution for

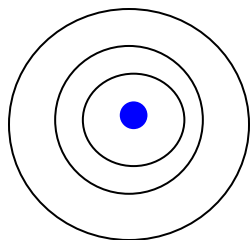
$n_{th} + {}^{235}\text{U}$  reaction



非对称核分裂

# (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



# 元素の周期表

	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0		
1	<sup>1</sup> H															<sup>2</sup> He		
2	<sup>3</sup> Li	<sup>4</sup> Be									<sup>5</sup> B	<sup>6</sup> C	<sup>7</sup> N	<sup>8</sup> O	<sup>9</sup> F	<sup>10</sup> Ne		
3	<sup>11</sup> Na	<sup>12</sup> Mg									<sup>13</sup> Al	<sup>14</sup> Si	<sup>15</sup> P	<sup>16</sup> S	<sup>17</sup> Cl	<sup>18</sup> Ar		
4	<sup>19</sup> K	<sup>20</sup> Ca	<sup>21</sup> Sc	<sup>22</sup> Ti	<sup>23</sup> V	<sup>24</sup> Cr	<sup>25</sup> Mn	<sup>26</sup> Fe	<sup>27</sup> Co	<sup>28</sup> Ni	<sup>29</sup> Cu	<sup>30</sup> Zn	<sup>31</sup> Ga	<sup>32</sup> Ge	<sup>33</sup> As	<sup>34</sup> Se	<sup>35</sup> Br	<sup>36</sup> Kr
5	<sup>37</sup> Rb	<sup>38</sup> Sr	<sup>39</sup> Y	<sup>40</sup> Zr	<sup>41</sup> Nb	<sup>42</sup> Mo	<sup>43</sup> Tc	<sup>44</sup> Ru	<sup>45</sup> Rh	<sup>46</sup> Pd	<sup>47</sup> Ag	<sup>48</sup> Cd	<sup>49</sup> In	<sup>50</sup> Sn	<sup>51</sup> Sb	<sup>52</sup> Te	<sup>53</sup> I	<sup>54</sup> Xe
6	<sup>55</sup> Cs	<sup>56</sup> Ba	<sup>L</sup>	<sup>72</sup> Hf	<sup>73</sup> Ta	<sup>74</sup> W	<sup>75</sup> Re	<sup>76</sup> Os	<sup>77</sup> Ir	<sup>78</sup> Pt	<sup>79</sup> Au	<sup>80</sup> Hg	<sup>81</sup> Tl	<sup>82</sup> Pb	<sup>83</sup> Bi	<sup>84</sup> Po	<sup>85</sup> At	<sup>86</sup> Rn
7	<sup>87</sup> Fr	<sup>88</sup> Ra	<sup>A</sup>															
	<sup>L</sup>	<sup>57</sup> La	<sup>58</sup> Ce	<sup>59</sup> Pr	<sup>60</sup> Nd	<sup>61</sup> Pm	<sup>62</sup> Sm	<sup>63</sup> Eu	<sup>64</sup> Gd	<sup>65</sup> Tb	<sup>66</sup> Dy	<sup>67</sup> Ho	<sup>68</sup> Er	<sup>69</sup> Tm	<sup>70</sup> Yb	<sup>71</sup> Lu		
	<sup>A</sup>	<sup>89</sup> Ac	<sup>90</sup> Th	<sup>91</sup> Pa	<sup>92</sup> U	<sup>93</sup> Np	<sup>94</sup> Pu	<sup>95</sup> Am	<sup>96</sup> Cm	<sup>97</sup> Bk	<sup>98</sup> Cf	<sup>99</sup> Es	<sup>100</sup> Fm	<sup>101</sup> Md	<sup>102</sup> No	<sup>103</sup> Lr		

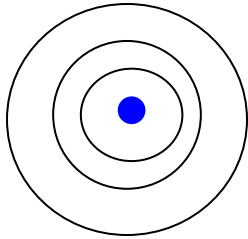


- 典型金属元素
- 半金属元素
- 非金属元素
- 遷移金属元素
- 希ガス



## (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)

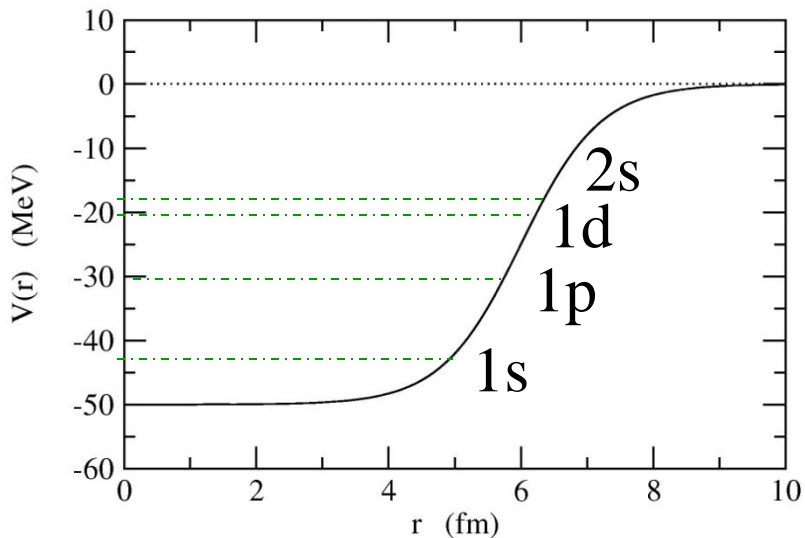


殻構造

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

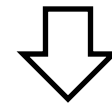
あまりにも研究の時期が「早すぎた」ため  
偉大な業績が歴史に埋もれてしまった悲運の科学者 *Hidesaburo Hiyama*

- 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

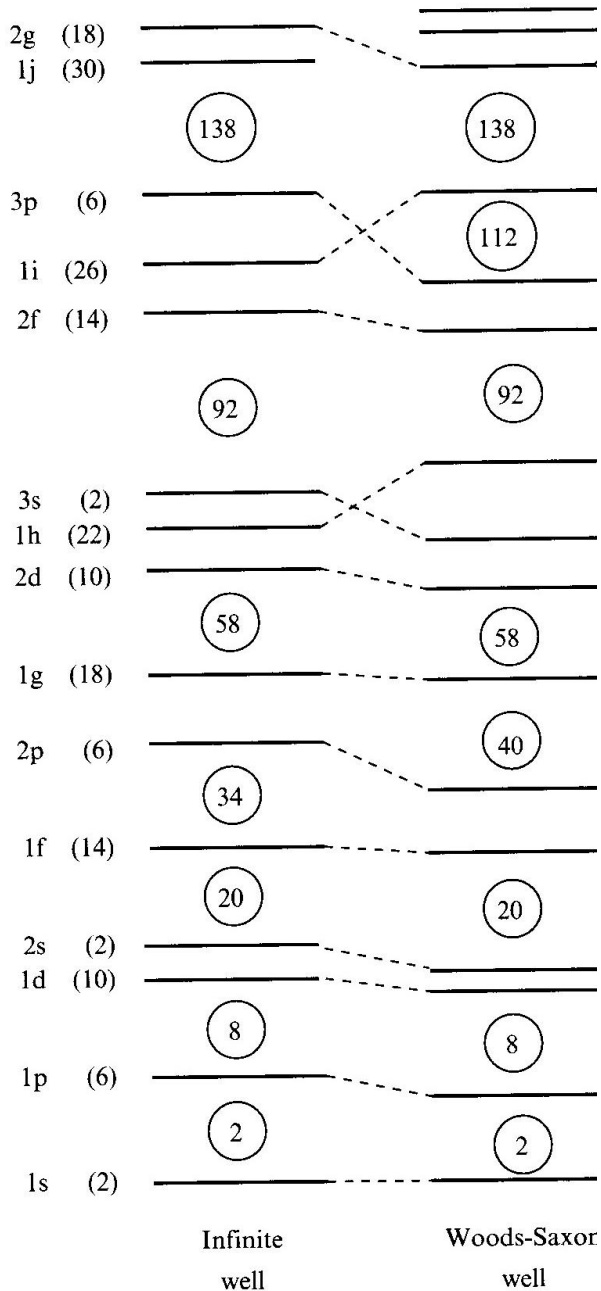


中性子の分離エネルギー、  
原子核の安定領域、  
磁気モーメント

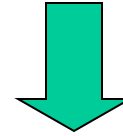
など当時測定されていた  
実験データをきれいに説明

（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



- 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)

「お母さん、ノーベル賞をもらおう」  
シャロン・バーチ著

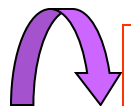
## jj 結合殻模型

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

## スピン・軌道力

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

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



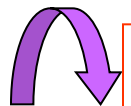
$$\psi_{jlm}(\mathbf{r}) = \frac{u_{jl}(r)}{r} \mathcal{Y}_{jlm}(\hat{\mathbf{r}})$$

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

## jj 結合殻模型

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

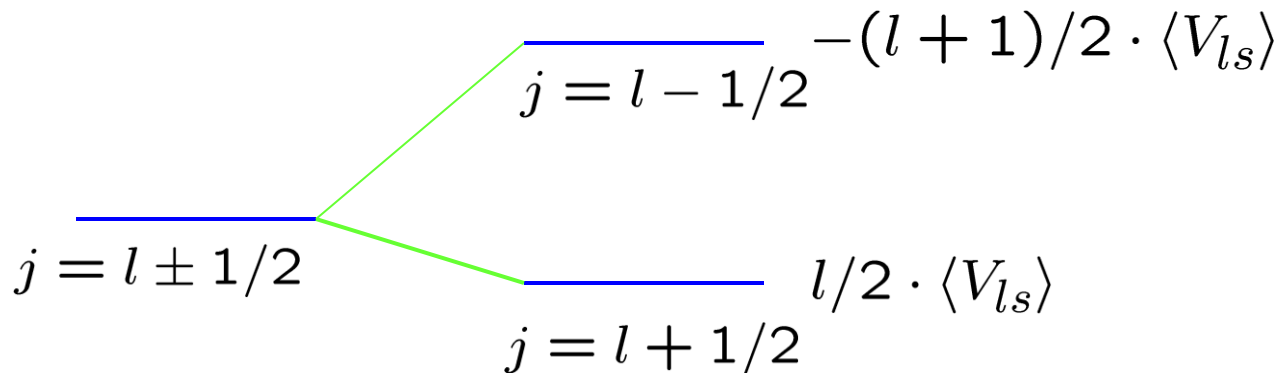
(note)  $j = l + s \implies \mathbf{l} \cdot \mathbf{s} = (j^2 - l^2 - s^2)/2$

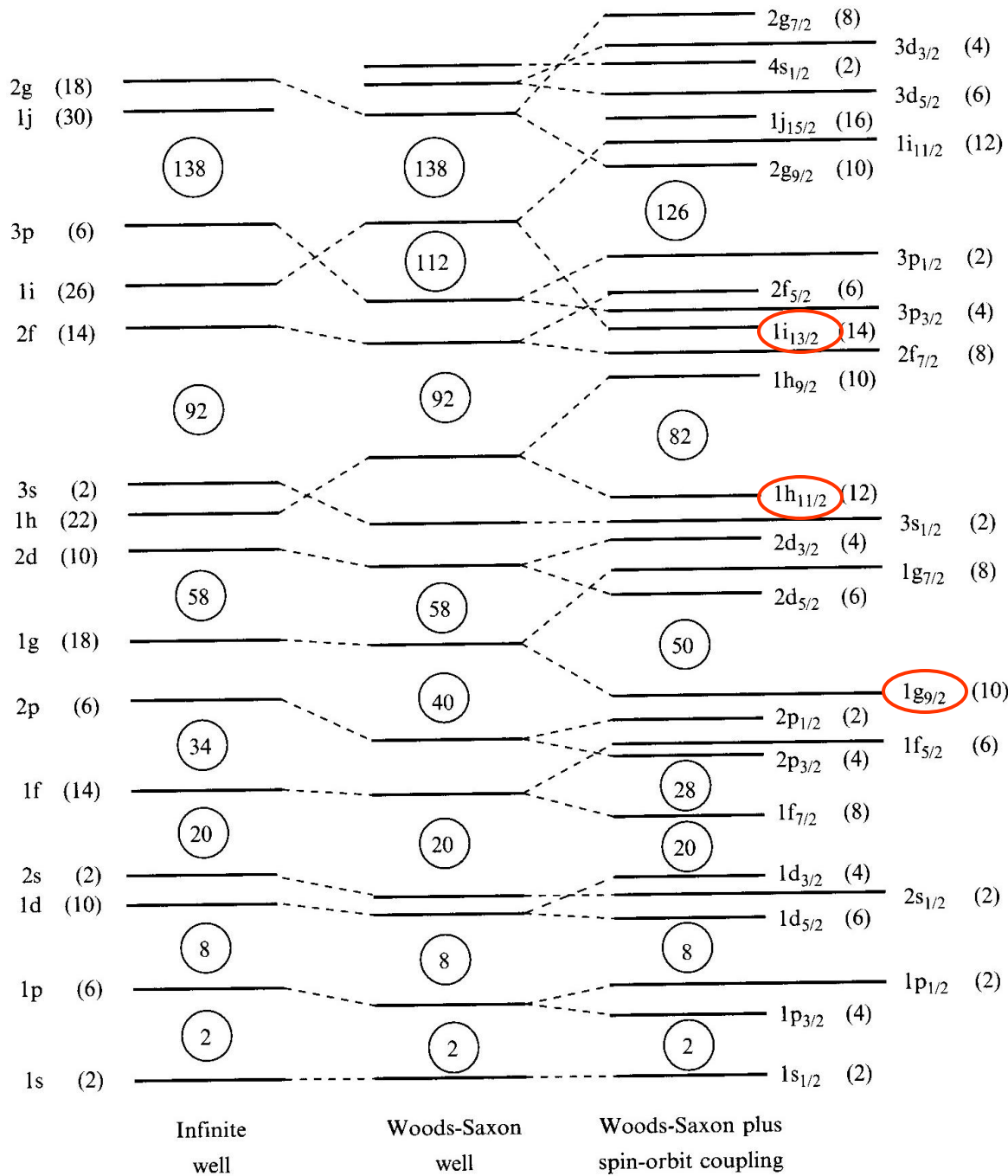


$$\psi_{jlm}(\mathbf{r}) = \frac{u_{jl}(r)}{r} \mathcal{Y}_{jlm}(\hat{\mathbf{r}})$$

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

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





intruder 状態  
unique parity 状態

# 一粒子準位

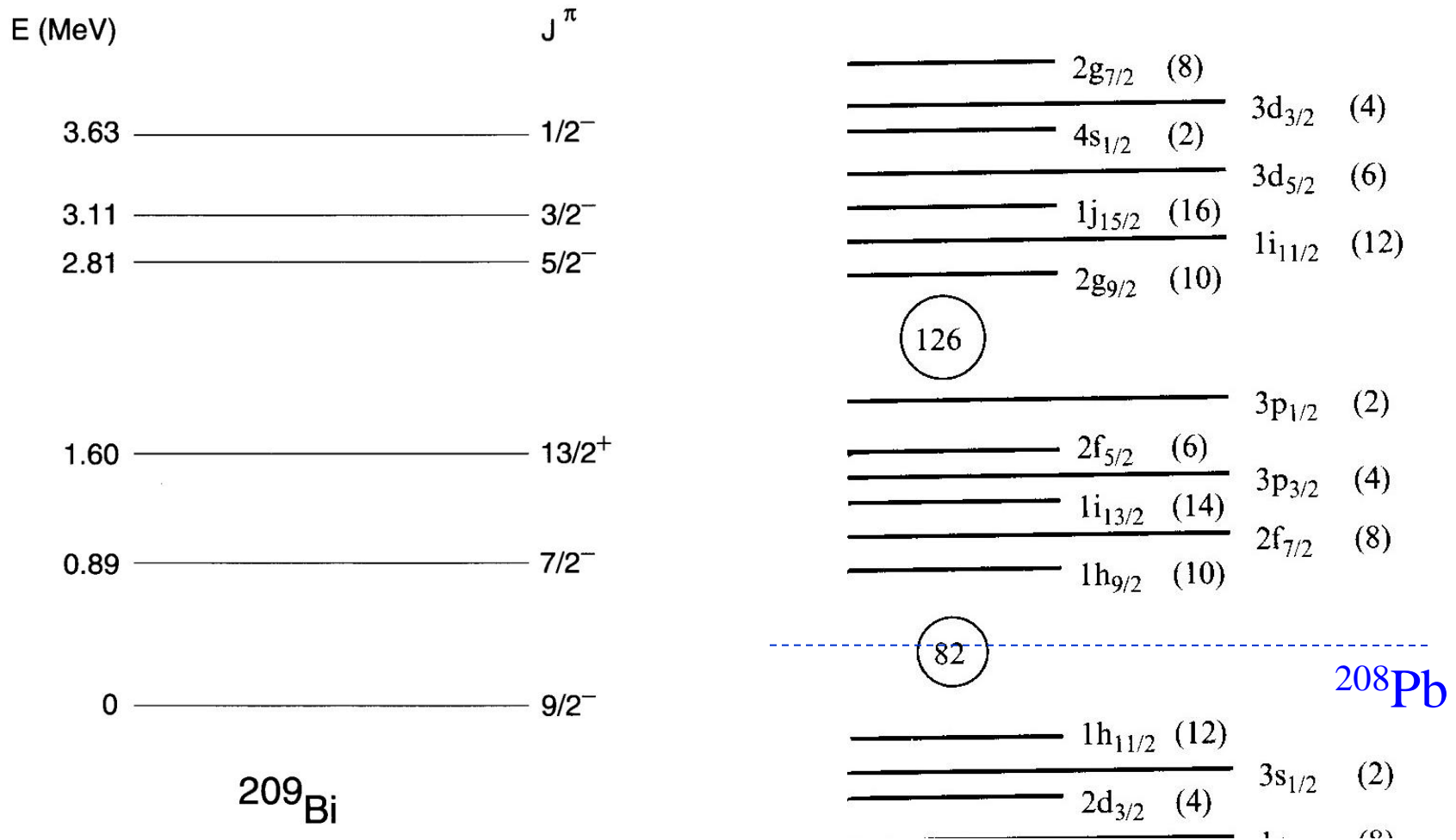
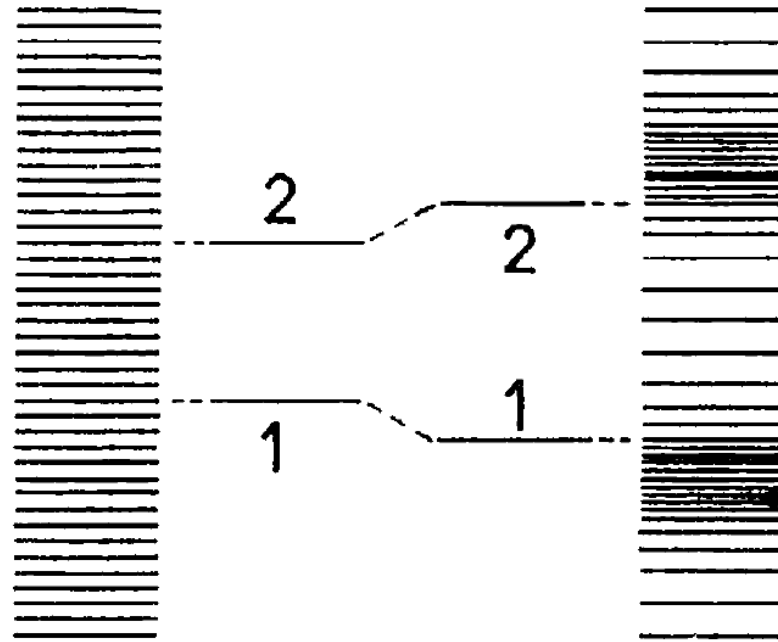


FIG. 3.6. Low-lying single-particle levels of  $^{209}\text{Bi}$ .



# 何故、閉殻の原子核は安定になるのか？

準位密度



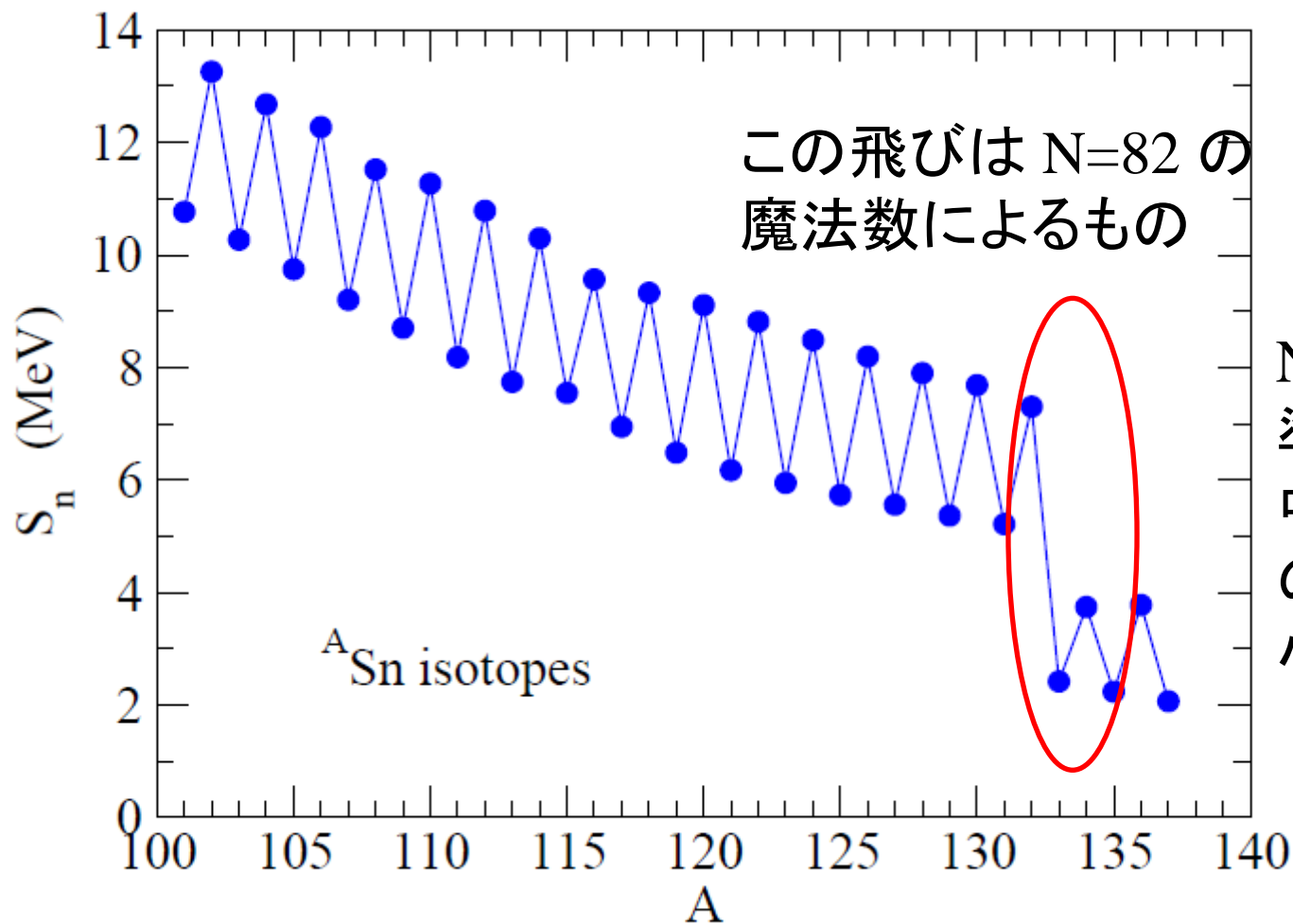
(a)

(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



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

# 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



~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

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									B	C	N	O	F	Ne		
3	Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	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