

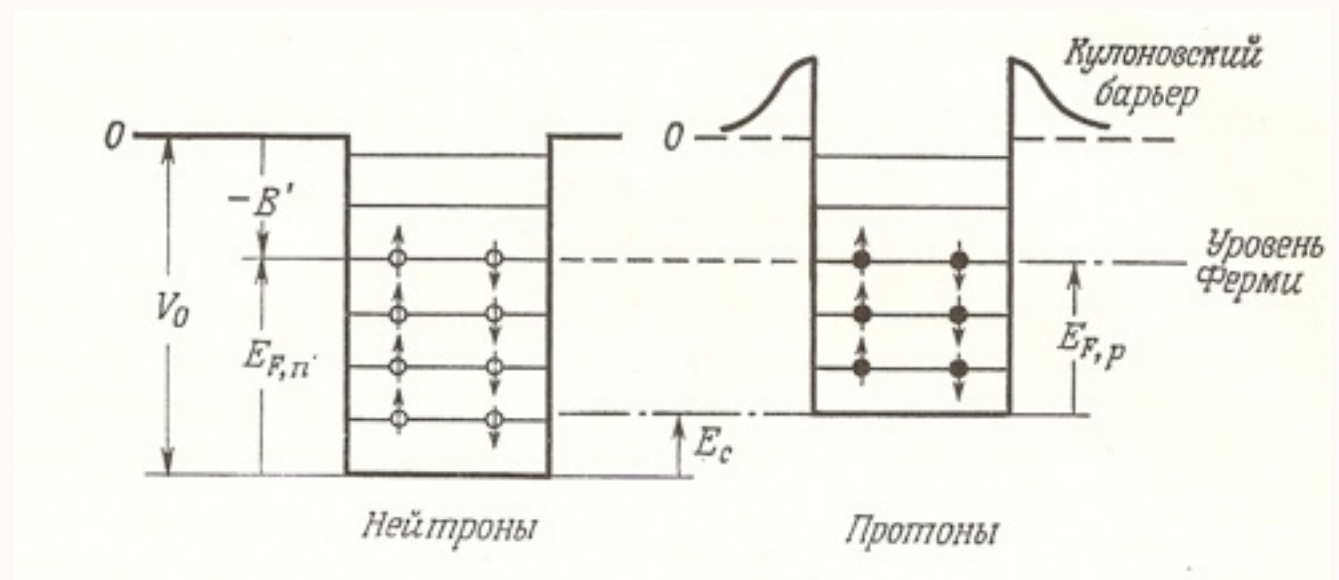
# МОДЕЛИ ЯДРА

Р.М. Джилкибаев





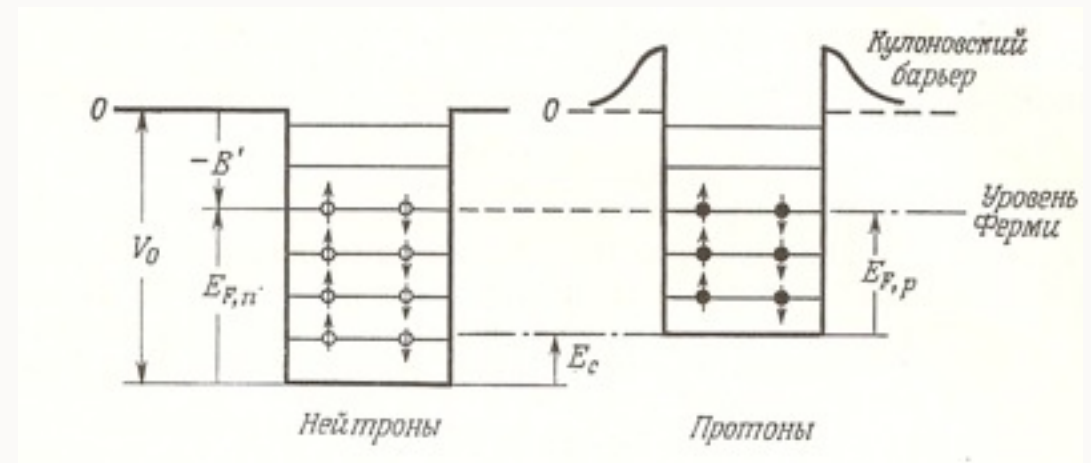
# МОДЕЛЬ ФЕРМИ



- вырожденный ферми-газ
- $p_{\max} = p_{\text{fermi}}$
- число состояний  $n = V \frac{4\pi}{3} \frac{p_{\max}^3}{(2\pi\hbar)^3}$

# ЭНЕРГИЯ ФЕРМИ

- $n = V 4\pi p_{\max}^3 / 3 / (2\pi\hbar)^3$
- $2n = N, N = V p_n^3 / (3\pi^2\hbar^3)$
- $R = R_0 A^{1/3}; V = 4\pi R_0^3 A / 3$
- $p_n = (\hbar / R_0)(9\pi N / 4A)^{1/3}; p_p = (\hbar / R_0)(9\pi Z / 4A)^{1/3}$
- $E_F = p_F^2 / 2m$
- $p_{\text{Fermi}} = 250 \text{ MeV}; E_{\text{Fermi}} = 30 \text{ MeV}$



# МОДЕЛЬ ФЕРМИ

## СРЕДНЯЯ ЭНЕРГИЯ НУКЛОНА

- Средняя энергия нуклона

- $\langle E_{av} \rangle = \int E d^3p / \int d^3p = 3/5 (p_F^2 / 2m)$

- $\langle E(N,Z) \rangle = 0.3 / m (N p_n^2 + Z p_p^2)$

- $\langle E(N,Z) \rangle = 0.3 / m (h / R_0)^2 (9\pi / 4A)^{2/3} (N^{5/3} + Z^{5/3})$

- при заданном  $A$ ,  $\langle E(N,Z) \rangle$  min при  $N = Z$



# MIN ЭНЕРГИЯ

- $Z - N = x$
- $Z + N = A$
- $Z = 0.5 A (1 + x / A), N = 0.5 A (1 - x / A)$
- $(1 + x)^n = 1 + nx + n(n-1)/2 x^2 + \dots$
- $\langle E(N,Z) \rangle = 0.3/m (h/R_0)^2 (9\pi/8)^{2/3} (A + 5/9 (Z-N)^2/A)$
- $\langle E(N,Z) \rangle = 11 \text{ MeV } (Z-N)^2/A, a_{\text{sym}} = 22.5 \text{ MeV}$

# ЭНЕРГИЯ СИММЕТРИИ

- Допущение, что глубина ямы не зависит от избытка  $N-Z$  нейтронов ядре, неверно
- Принцип Паули ослабляет взаимодействие между одинаковыми частицами, так как запрещает определенные одночастичные состояния
- Среднее взаимодействие между  $p-p$  и  $n-n$  меньше чем взаимодействие между  $p$  и  $n$

# ОБОЛОЧЕЧНАЯ МОДЕЛЬ

- Магические числа  $N$  или  $Z = 2 \ 8 \ 20 \ 28 \ 50 \ 82 \ 126$
- Распространенность элементов
- в природе

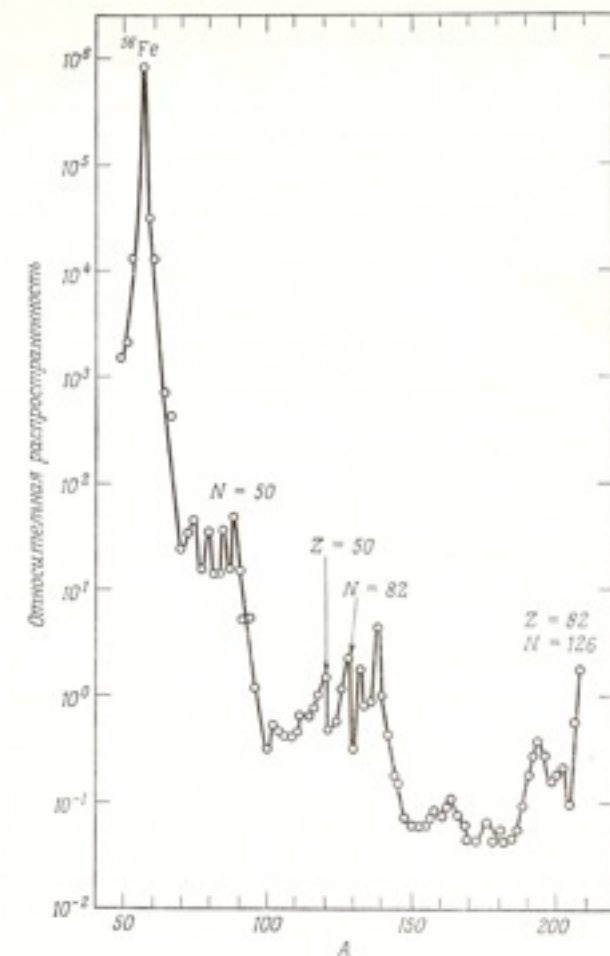
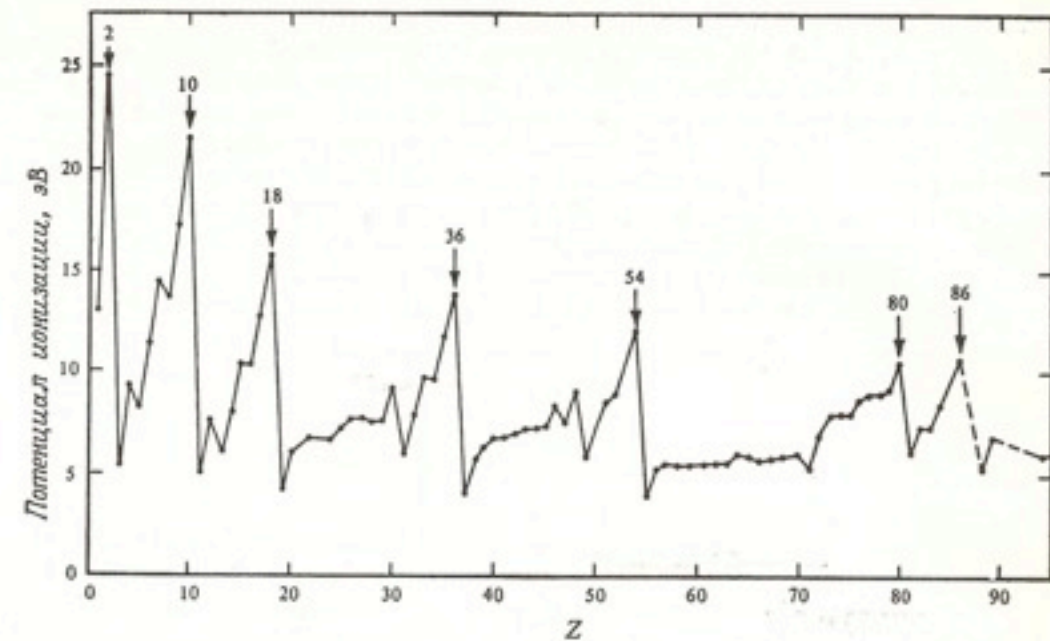


Рис. 15.1. Зависимость относительной распространенности  $H$  в природе различных четно-четных ядер от числа нуклонов в ядре  $A$ . Кривая нормирована так, что для ядра Si распространенность условно положена равной  $10^6$ . См. работу [7], стр. 125.

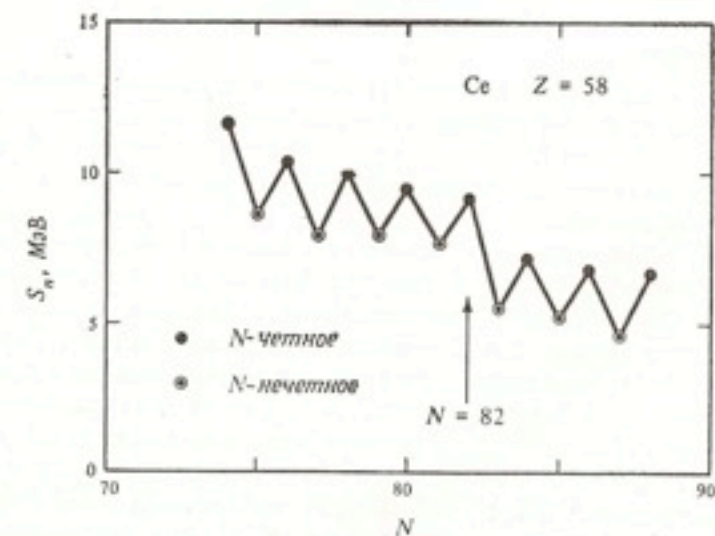


# ОБОЛОЧЕЧНАЯ МОДЕЛЬ

- Заполнение оболочек



Фиг. 15.2. Энергии отрыва электрона от нейтрального атома (потенциалы ионизации). См. работу [8].



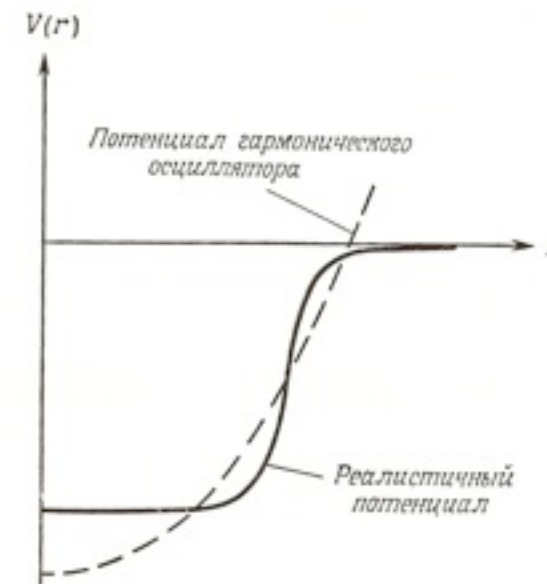
Фиг. 15.3. Энергия отрыва последнего нейтрона для изотопов ядра церия.

33-0796

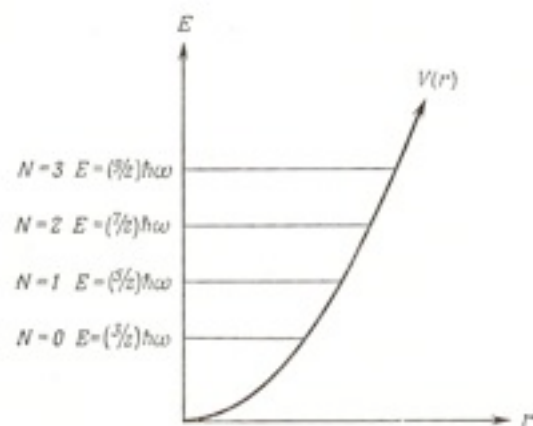


# ОБОЛОЧЕЧНАЯ МОДЕЛЬ

- Кратность вырождения
- $(N+1)(N+2)$
- 3 D осциллятор
- s,p,f,d,g,h -1,2,3,4,5



Фиг. 15.5. Более реалистичный потенциал, воспроизводящий ход кривой плотности нуклонов в ядре, и потенциал гармонического осциллятора.



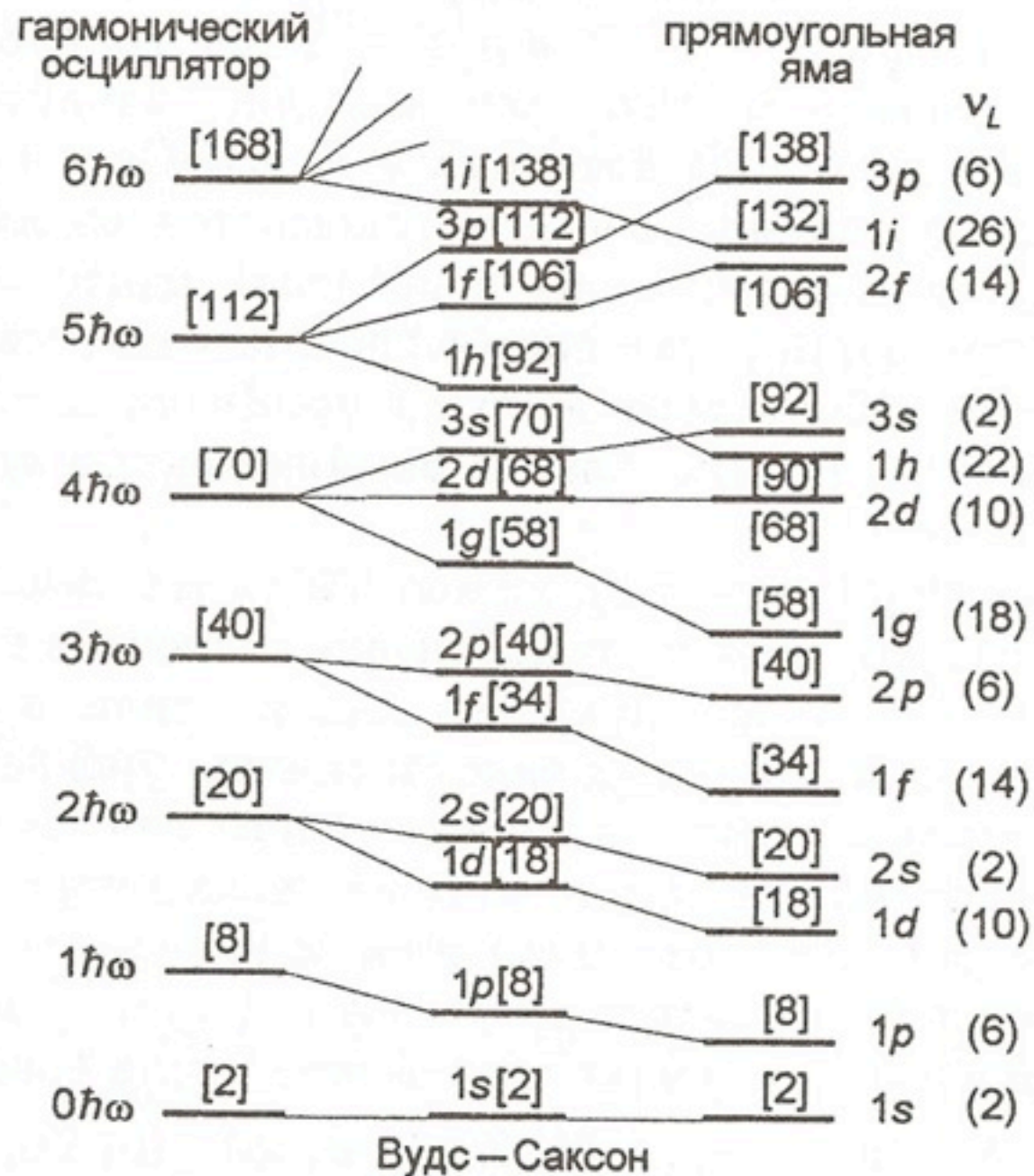
Фиг. 13.7. Трехмерный гармонический осциллятор и его уровни энергии.

Осцилляторные оболочки для трехмерного гармонического осциллятора

N	Орбита	Четность	Кратность вырождения	Полное число уровней
0	1s	+	2	2
1	1p	-	6	8
2	2s, 1d	+	12	20
3	2p, 1f	-	20	40
4	3s, 2d, 1g	+	30	70
5	3p, 2f, 1h	-	42	112
6	4s, 3d, 2g, 1i	+	56	168

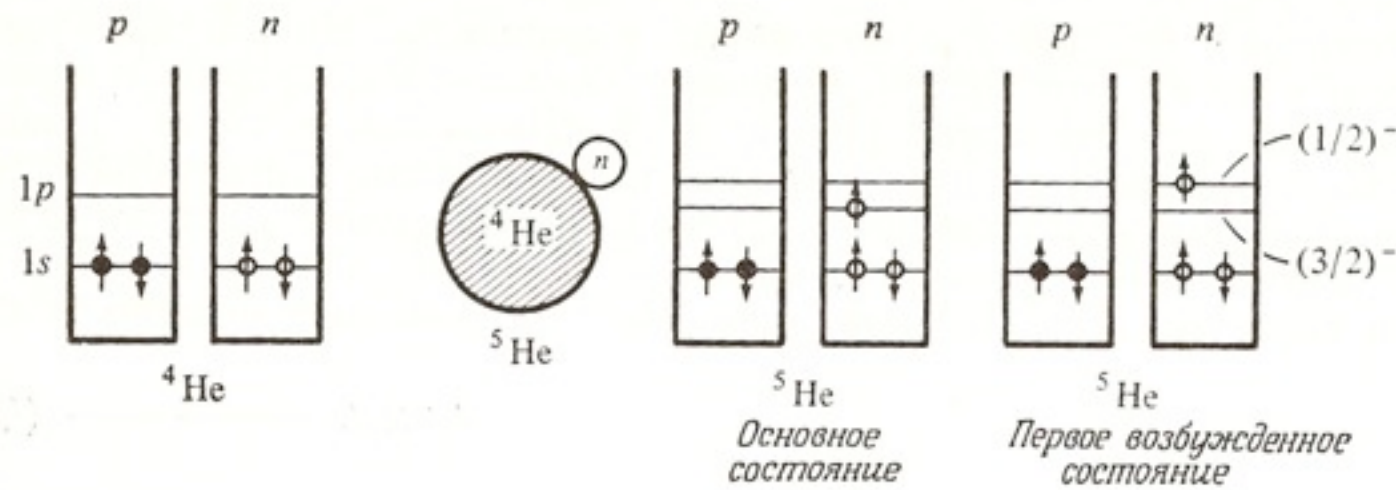
# ОБОЛОЧЕЧНАЯ МОДЕЛЬ

- Сферически сим.
- потенциал  $V(r)$
- $V(r) = -V_0 + k\omega^2 r^2$
- Вудса-Саксона  $V$
- $\Rightarrow V_0 / (1 + e^{(r-R)/a})$
- $V_0 = 40-50 \text{ MeV}$
- $a = 0.55 \text{ fm}$

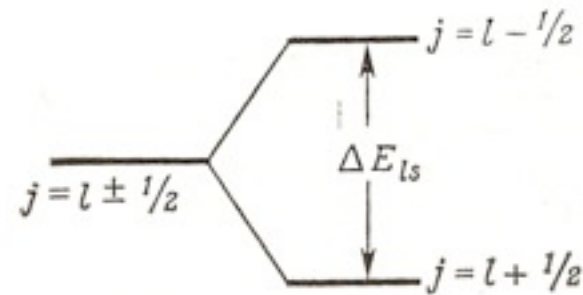




# ОБОЛОЧЕЧНАЯ МОДЕЛЬ



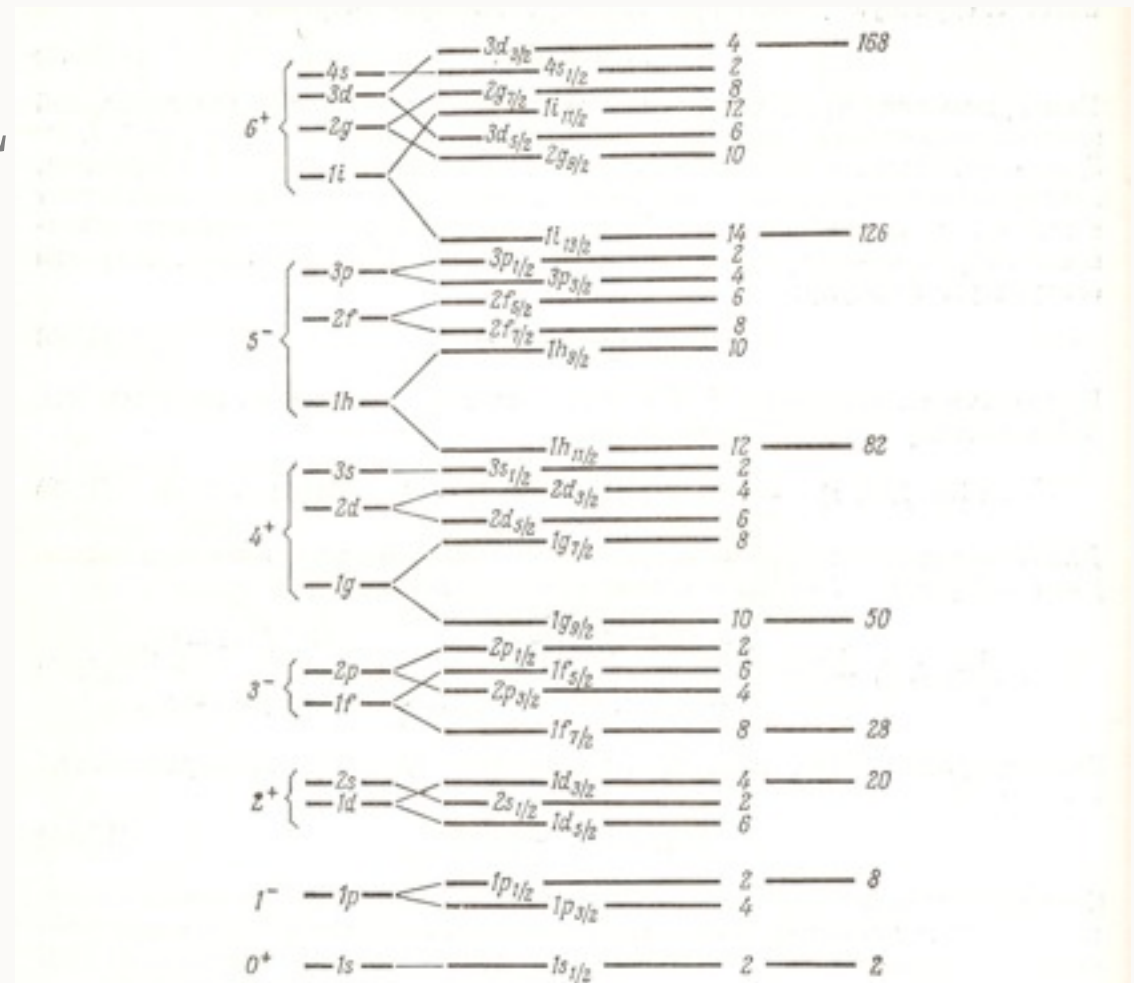
Фиг. 15.8. Заполнение однонуклонных энергетических уровней для ядер  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^5\text{He}$ ,  ${}^5\text{He}^*$ . Кулоновским взаимодействием ради простоты пренебрегается, и протонная и нейтронная ямы взяты одинаковыми. Кроме того, для каждой ямы показаны только два самых низких энергетических уровня.



Фиг. 15.9. Расщепление уровня с данным значением  $l$  на два подуровня. Спин-орбитальное взаимодействие понижает уровень с полным моментом количества движения  $j = l + 1/2$  и поднимает уровень с  $j = l - 1/2$ .

# ОБОЛОЧЕЧНАЯ МОДЕЛЬ, СПИН-ОРБИТАЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

- $j=L \pm 1/2; 2j+1 = 2L+2, 2L$
- $V_{ls} = C [r_{12} \times p_{12}] (s_1 + s_2)$
- $r_{12} = r_1 - r_2, p_{12} = p_1 - p_2$
- $Q(r_2) = Q(r_1) + (r_1 - r_2) \nabla Q(r_1)$
- $V_{ls}(r_1) = C / r_1 dQ / dr_1 (1 s)$
- $C \approx \int V(r) r^2 d^3r$

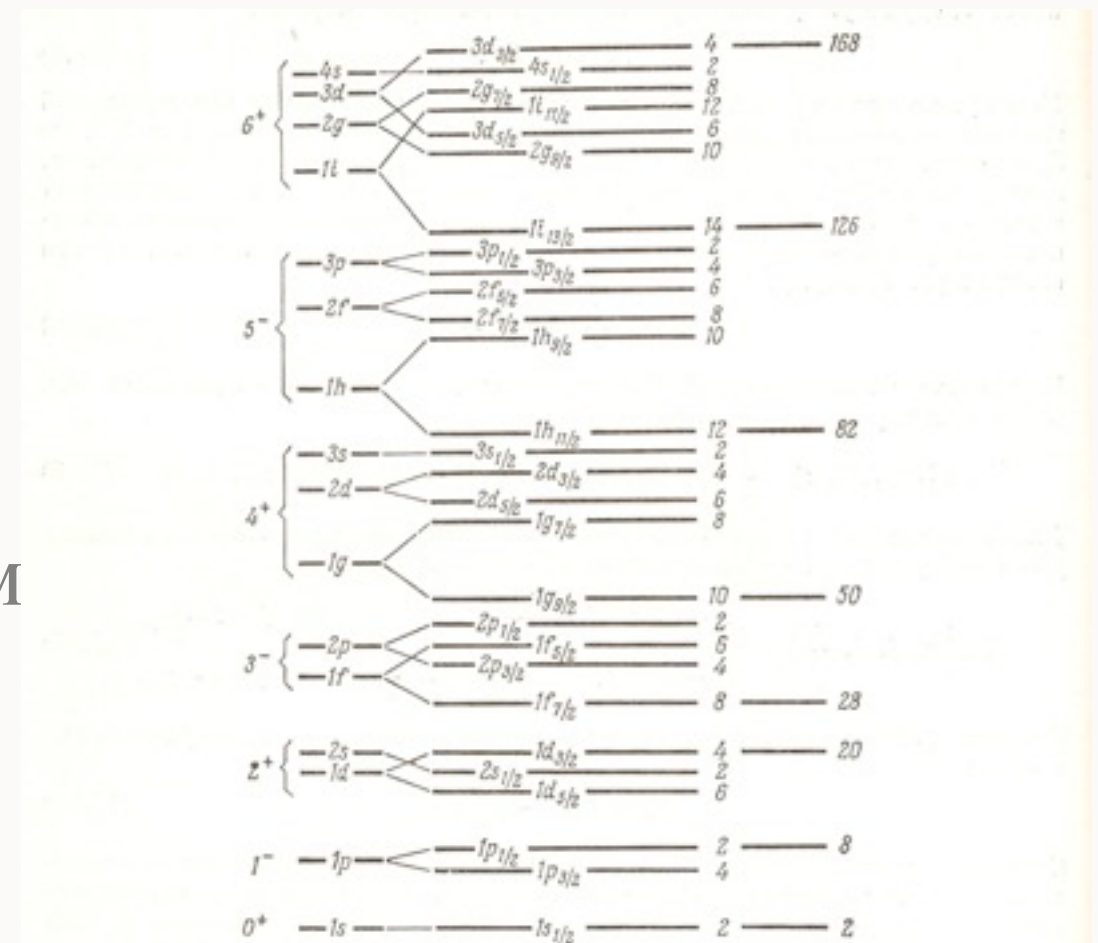


Фиг. 15.10. Примерный вид диаграммы энергетических уровней для протонов и нейтронов. Указаны числа протонов и нейтронов на каждом уровне, а также суммарные числа. Осцилляторная группировка уровней показана слева. Нейтроны и протоны имеют примерно одинаковые диаграммы уровней вплоть до  $A = 50$ . Для больших значений  $A$  начинаются различия. Уровни для нейтронов с малыми моментами количества движения лежат ниже уровней для протонов с малыми моментами количества движения.



# ОДНОЧАСТИЧНАЯ ОБОЛОЧЕЧНАЯ МОДЕЛЬ

- Одночастичная модель
- нуклоны движутся в
- сфер-сим. потенциале и не
- взаимодействуют друг с другом
- только один добав. или недост.
- нуклон определяет свойства
- ядра



Фиг. 15.10. Примерный вид диаграммы энергетических уровней для протонов и нейтронов. Указаны числа протонов и нейтронов на каждом уровне, а также суммарные числа. Осцилляторная группировка уровней показана слева. Нейтроны и протоны имеют примерно одинаковые диаграммы уровней вплоть до  $A = 50$ . Для больших значений  $A$  начинаются различия. Уровни для нейтронов с малыми моментами количества движения лежат ниже уровней для протонов с малыми моментами количества движения.