

静岡大学理学部物理学科 嘉規香織 2019年12月12日



周期\族	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	П	12	13	14	15	16	17	18
I	I H		-												2 He			
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	II Na	12 Mg											I 3 Al	l 4 Si	15 P	16 S	I 7CI	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	38 Cd	49 In	50 Sn	5 I Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	La 系	72 Hf	73 Ta	74 W	7 5Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 TI	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	Ac 系	I 04 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	III Rg	II2 Cn	I I 3 Nh	II4 Fl	115 Mc	l I 6 Lv	7 Ts	118 Og
	ランノー	ノタ イド	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 ТЬ	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
	アク	フチ イド	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Mb	102 No	103 Lr	









名称	強さ	影響範囲(m)	媒介粒子	spin • parity
強い力	I	I 0 ⁻¹⁵	グル-オン	1-
電磁力	I 0 ⁻²	無限大	光子(フォトン)	1-
弱い力	10-13	I 0 ⁻¹⁸	ウィークボゾン	1-
重力	10 ⁻³⁹	無限大	重力子(グラビトン)	2-



核子(陽子・中性子)の間の強い カ(核力)は、パイ中間子が交換 されて働くことを湯川秀樹博士が 予言(1935年).1949年にノーベ ル物理学賞を受賞.



2つの陽子の間に働く重力とクーロンカの大きさの比



$$G = 6.672 \times 10^{-11} [\text{Nm}^2 \text{kg}^{-2}]$$

$$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} [\text{N}^{-1} \text{m}^{-2} \text{C}^2]$$

$$m_p = 1.673 \times 10^{-27} [\text{kg}] \quad m_e = 9.110 \times 10^{-31} [\text{kg}]$$

$$e = 1.602 \times 10^{-19} [\text{C}]$$

$$\frac{\left|\frac{F_{G}}{F_{C}}\right| = \frac{Gm_{p}m_{p}}{e^{2}} \times 4\pi\varepsilon_{0}$$
$$= 8.096 \times 10^{-37} \qquad \qquad \left|\frac{F_{G}}{F_{C}}\right| \sim \frac{10^{-39}}{10^{-2}} \sim 10^{-37}$$











n

⁴n









- > 大きさ
 - $10^{3}m = 1$ km
 - $I0^{0}m = Im$
 - $10^{-2}m = 1cm$
 - $10^{-6}m = 1\mu m$
 - $10^{-9}m = Inm$
 - $(10^{-10}m = 1 \text{ Å})$
 - $10^{-12}m = Ipm$
 - $10^{-15}m = 1 \text{ fm}$

重さ(静止エネルギー) 1kg=1000g $= E = mc^2$ \implies 8.99 \times 10¹⁶] 電子の質量 9.11 \times 10⁻³¹kg \rightarrow 8.19 \times 10⁻¹⁴J $= 5.11 \times 10^{5} \text{ eV}$ = 0.51 MeV

エネルギーの単位
m=lkg
v=lm/s
$$E=0.5 J$$

e=1.6×10⁻¹⁹C
V=lV $E=1 eV$
T=I K
こ $E=1.38×10^{-23} J$
T=10⁸ K
E=8.61 keV

 $I eV = 1.602 \times 10^{-19}J$ $I0^{3} eV = I keV$ $I0^{6} eV = I MeV$ $I0^{9} eV = I GeV$ $I0^{12}eV = I TeV$

物質	kg	MeV
電子	9.109×10 ⁻³¹	0.511
陽子	I.673×I0 ⁻²⁷	938.3
中性子	1.675×10 ⁻²⁷	939.6





非常に軽い7核種:²H,³He,⁶Li,⁷Li,⁸Be,¹⁰B.¹¹B 重陽子(deuteron/deuterium)の例

 Mc^2

 $(m_p + m_n)c^2$ = 938.2796 + 939.5731=1877.8527(Mev)

-B = 1875.6280 - 1877.8527= -2.2247 (MeV)=1875.6280(MeV)

● ヘリウム⁴Heの例 B = 28.296(MeV)

B / A = 7.074 (MeV)



(1) N=Zで安定: Fermiガス模型
 A=Z+N個の核子(陽子と中性子),体積V
 互いに相互作用しない自由なFermi粒子系

微小な位相空間の体積: $(\Delta x \Delta p)^3$ Iつの状態の位相体積: $h^3 \leftarrow \text{Planc定数}$ 粒子の状態の数: Δn $\Delta n = 2 \frac{(\Delta x \Delta p)^3}{h^3} \longrightarrow n = 2 \frac{V}{(2\pi)^3} \iiint d^3 k$ $h = 2\pi \hbar, \mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}$

状態は $\mathbf{k} = 0$ から $\mathbf{k} = \mathbf{k}_F$ までを占めているとする

$$\begin{array}{c} & \longrightarrow n = 2 \frac{V}{(2\pi)^3} \int_0^{k_F} 4\pi k^2 dk = \frac{Vk_F^3}{3\pi^2} \\ k_F = \left(3\pi^2 \rho\right)^{1/3}, \quad \rho = \frac{n}{V} \\ & Fermi波数 \qquad \text{数密度} \\ & Fermi II R U + - \\ \varepsilon_F = \frac{\hbar^2}{2m} \left(3\pi^2 \rho\right)^{2/3} \underset{Z = N = \frac{A}{2}}{\sum e_F} = \frac{\hbar^2}{2m} \left(3\pi^2 \frac{A}{2V}\right)^{2/3} \\ \rho = \frac{A}{V} = 0.17 \text{ fm}^{-3} \\ \hbar c = 197.3 \text{ MeV fm} \\ mc^2 \sim 940 \text{ MeV} \end{array}$$

陽子のFermiエネルギー

$$\varepsilon^{(p)}_{F} = \frac{\hbar^2}{2m} \left(3\pi^2 \frac{Z}{V}\right)^{2/3} = \left(\frac{2Z}{A}\right)^{2/3} \varepsilon_F$$

中性子のFermiエネルギー $\varepsilon^{(n)}_{F} = \frac{\hbar^{2}}{2m} \left(3\pi^{2} \frac{N}{V} \right)^{2/3} = \left(\frac{2N}{A} \right)^{2/3} \varepsilon_{F}$ Z個の陽子とN個の中性子の平均エネルギー

$$T = Z \left\langle T^{(p)} \right\rangle + N \left\langle T^{(n)} \right\rangle = \frac{3}{5} Z \left(\frac{2Z}{A}\right)^{2/3} \varepsilon_F + \frac{3}{5} N \left(\frac{2N}{A}\right)^{2/3} \varepsilon_F$$

$$= \frac{3}{5} \varepsilon_F 2^{2/3} A \left\{ \left(\frac{Z}{A}\right)^{5/3} + \left(\frac{N}{A}\right)^{5/3} \right\}$$

$$\begin{aligned} x &= \frac{Z}{A}, \quad \frac{N}{A} = 1 - x, \quad 0 < x < 1 \\ T &= T(x) = \frac{3}{5} \varepsilon_F 2^{2/3} A \left\{ x^{5/3} + (1 - x)^{5/3} \right\} \\ \times \mathcal{O}$$
関数として極値を求める
$$\frac{dT(x)}{dx} = C \frac{5}{3} \left\{ x^{2/3} - (1 - x)^{2/3} \right\} = 0 \implies x = 1 - x, \quad x = \frac{1}{2} \\ \frac{d^2 T(x)}{dx^2} = C \frac{10}{9} \left\{ x^{-1/3} + (1 - x)^{-1/3} \right\} > 0 \implies x = 1/2 \ cm$$

Z=Nでエネルギーが最も低い安定な状態になる

 $\delta = \frac{N-Z}{A}, \quad \frac{Z}{A} = \frac{1-\delta}{2}, \quad \frac{N}{A} = \frac{1+\delta}{2}$ $T = \frac{3}{10} \varepsilon_F A \left\{ (1 - \delta)^{5/3} + (1 + \delta)^{5/3} \right\}$

対称($\delta=0$)と非対称($\delta\neq0$)の差 $T_{S} = T - T(\delta=0) \sim \frac{1}{3} \varepsilon_{F} A \delta^{2} = \frac{\varepsilon_{F}}{3} \frac{(N-Z)^{2}}{A}$ 対称エネルギーの項



(2) N=Zで安定:核力A=2の場合:2核子系/重陽子

陽子と中性子は核子の2つの異なる状態である → 区別する指標:アイソスピン±1/2 それぞれの核子は2つの異なる状態をとれる → 区別する指標:スピン±1/2

2核子系 ← 同種フェルミオン系
 フェルミオンの掟: □つの状態を占められるのは□つ
 Pauli原理

2核子系(T=I) |n>|n> スピン(S=0) ↑↓ 軌道角運動量(L=0)

|n>|p>+|p>|n> |p>|p> ↑ ↓ - ↑ ↓ ${}^{2S+1}L_I = {}^1S_0$

2核子系(T=0) |n>|p>-|p>|n> $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$ スピン(S=I) 軌道角運動量(L=0,2) ${}^{2S+1}L_J = {}^3S_1(+ {}^3D_1)$ ↓ + ↑ テンソルカ $T_z = I$ $T_{7}=0$ z = 1核内でpnのペア を増やす働き PP np nn E=0-2.23MeV T=0重陽子 np



(1) 核破砕反応







(1) 魔法数(マジックナンバー)の消失と出現(2) 中性子ハロー(3) 核物質の状態方程式/中性子星

く参考文献> (1)「不安定核の物理」中村隆司著 Frontiers in Physics 8 共立出版 (2)「大学院原子核物理」中村誠太郎監修 講談社サイエンティフィック Table 1. New nuclides reported in 2018. The nuclides are listed with the first author, submission date, and reference of the publication, the laboratory where the experiment was performed, and the production method (PF = projectile fragmentation, FE = fusion evaporation, SB = secondary beams).

Nuclide(s)	First Author	Subm. Date	Ref.	Laboratory	Type
¹⁶¹ Pr , ¹⁶³ Nd, ¹⁶⁴ Pm, ¹⁶⁵ Pm,	N. Fukuda	2/20/2017	11	RIKEN	PF
¹⁶⁷ Sm, ¹⁶⁹ Eu, ¹⁷¹ Gd, ¹⁷³ Tb,					
¹⁷⁴ Tb, ¹⁷⁵ Dy, ¹⁷⁶ Dy, ¹⁷⁷ Ho,					
¹⁷⁸ Ho, ¹⁷⁹ Er, ¹⁸⁰ Er					
¹⁰⁴ Rb, ¹¹³ Zr, ¹¹⁶ Nb, ¹¹⁹ Mo,	Y. Shimizu	3/8/2017	12	RIKEN	\mathbf{PF}
¹²² Tc, ¹²⁵ Ru, ¹²⁸ Rh, ¹³⁰ Pd,					
¹³¹ Pd, ¹⁴⁰ Sn, ¹⁴² Sb, ¹⁴⁵ Te,					
¹⁴⁶ I, ¹⁴⁷ I, ¹⁴⁹ Xe, ¹⁵⁰ Xe, ¹⁵⁷ La					
²¹⁹ Np	H.B. Yang	9/18/2017	13	Lanzhou	\mathbf{FE}
224 Np	T.H. Huang	1/10/2018	14	Lanzhou	\mathbf{FE}
⁴⁷ P, ⁴⁹ S, ⁵² Cl, ⁵⁴ Ar, ⁵⁷ K,	O.B. Tarasov	5/7/2018	15	RIKEN	\mathbf{PF}
⁵⁹ Ca, ⁶⁰ Ca, ⁶² Sc, ⁵⁹ K					
²⁸ Cl, ³⁰ Cl , ²⁹ Ar	I. Mukha	6/9/2018	16	GSI	\mathbf{SB}
¹⁰⁴ Te, ¹⁰⁸ Xe	K. Auranen	7/31/2018	17	Argonne	\mathbf{FE}
²⁰ B, ²¹ B	S. Leblond	9/7/2018	18	RIKEN	SB

arXiv:1903.03224v1, M.Toennessen, to be appeared in Int. Jour. Mod. Phys. E "2018 update of discoveries of nuclides"

Nuclide(s)	First Author	Ref.	Year
²¹ C	S. Leblond	30,31	2015
	N. A. Orr	32	2016
²⁴ N, ²⁵ N	Q. Deshayes	24	2018
¹¹ O	T. B. Webb	25	2018
³⁹ Na	D. S. Ahn	33,34	2016/18
	O. B. Tarasov	35	2017
⁷⁹ Co. ⁸⁴ Cu	Y. Shimizu	26	2018
86 Zn ^a , 88 Ga, 89 Ga, 91 Ge, 93 As ^a , 94 As, 96 Se, 97 Se	Y. Shimizu	36	2015
98Sn	L Celikovic	22	2013
155 Ba 159 Ce 164 Nd 166 Pm 168 Sm	N Fukuda	37	2015
¹⁷⁰ Eu, ¹⁷² Gd, ¹⁷³ Gd, ¹⁷⁵ Tb, ¹⁷⁷ Dy, ¹⁷⁸ Ho, ¹⁷⁹ Ho,	rt, rukutu	51	2010
¹⁸⁰ Er, ¹⁸¹ Er, ¹⁸² Tm, ¹⁸³ Tm			
¹²⁶ Nd, ¹³⁶ Gd, ¹³⁸ Tb, ¹⁴³ Ho ^b ¹⁵⁰ Yb, ¹⁵³ Hf	G. A. Souliotis	38	2000
¹⁴³ Er, ¹⁴⁴ Tm	R. Grzywacz	39	2005
	K. Rykaczewski	40	2005
	C. R. Bingham	41	2005
²³⁰ At, ²³² Rn	J. Benlliure	42	2010
		43	2015
$^{235}\mathrm{Cm}$	J. Khuyagbaatar	44	2007
²⁵² Bk, ²⁵³ Bk	S. A. Kreek	45	1992
²⁶² No	R. W. Lougheed	$46,\!47$	1988/89
	E. K. Hulet	48	1989
²⁶¹ Lr, ²⁶² Lr	R. W. Lougheed	49	1987
	E. K. Hulet	48	1989
	R. A. Henderson	50	1991
²⁵⁵ Db	G. N. Flerov	51	1976
	AP. Leppänen	52	2005
$^{280}\mathrm{Ds}$	K. Morita	53	2014

Table 2. Nuclides only reported in proceedings or internal reports until the end of 2018. The nuclide, first author, reference and year of proceeding or report are listed.

 $^a\,$ also published in ref. 26

^b also published in ref. 54



Fig. 1. Discovery of nuclides as a function of year. The top figure shows the 10-year running average of the number of nuclides discovered per year while the bottom figure shows the cumulative number. The total number of nuclides shown by the black, solid lines are plotted separately for near-stable (red, short-dashed lines), neutron-deficient (purple, dot-dashed lines), neutron-rich (green, long-dashed lines) and transuranium (blue, dotted lines) nuclides. This figure was originally published in Ref. 5 and updated to include the most recent data.









量子力学:Schrődinger 方程式(3次元) 中心力ポテンシャル
調和振動子
$V(r) = \frac{1}{2}m\omega^2 r^2$
エネルギー順位
$E = \hbar \omega \left(n' + \frac{3}{2} \right)$
n' = 2(n-1) + l
原子核,野上茂吉郎,裳華房

(基礎物理学選書13)



$$U(r) = V(r) - \frac{\kappa}{(mc)^2} \frac{1}{r} \frac{dU(r)}{dr} (\mathbf{s} \cdot \mathbf{l})$$

スピン・軌道力

スピンと軌道角運動量の合成: $\mathbf{j} = \mathbf{l} + \mathbf{s}$

摂動の「次近似

$$E_{nlj} = E_{nl}^0 - \frac{\kappa}{2} \left(\frac{\hbar}{mc}\right)^2 \left\langle \frac{1}{r} \frac{dU}{dr} \right\rangle_{nl} \left\{ j(j+1) - l(l+1) - \frac{3}{4} \right\}$$



$$j = l + \frac{1}{2}, \quad E_{nll+\frac{1}{2}} = E_{nl}^{0} - \alpha_{nl} l$$

$$j = l - \frac{1}{2}, \quad E_{nll-\frac{1}{2}} = E_{nl}^{0} + \alpha_{nl} (l+1)$$

$$\alpha_{nl} = \frac{\kappa}{2} \left(\frac{\hbar}{mc}\right)^{2} \left\langle \frac{1}{r} \frac{dU}{dr} \right\rangle_{nl}$$

$$E_{nl}^{0} = l - \frac{1}{2}$$

$$\int \alpha_{nl} (2l+1)$$

$$j = l + \frac{1}{2}$$



日本物理学会誌 Vol.74 No.12,2019 「核質量でみる新魔法数34」 道正新一朗・小林 幹















E. K. Warburton, J.A. Becker, B.A. Brown, Phys. Rev. C41, 1147 (1990)











自発的対称性の破れ現象の一種







prolate

無変形/球形 sphere パンケーキ型 oblate











不安定核ビーム"Liを用いた実験 陽子を1つ取り除く 🛑 ¹⁰Heが生成される Z=2, N=8の2重閉殻 $^{10}\text{He} \rightarrow {}^{8}\text{He}+2n$ 核で安定なはず ¹⁰Heは束縛状態ではなく 共鳴状態であることが判明



N=8は魔法数ではない、⁸HeからN=6が新魔法数

中性子//ロー (neutron halo)

ハロー(halo)とは (1)宗教画の聖者の頭の周りに描かれる光の輪 (2)太陽や月の周りに現れる暈 (3)渦巻銀河の一部をなすガスや星の球状の雲

中性子ハロー核:"Li, "Be









安定な原子核の研究から分かっていること (1)半径は質量数AのI/3乗に比例する (2)核表面の厚さは大体Ifm (3)陽子と中性子の分布は相似形をしている

核力の飽和性,到達距離,対称性等の基本的な性質から導かれる ← 安定原子核で確立したもの





物理学最前線8 共立出版 中村隆司著 「不安定原子核の物理」より





原子核中での核子
の平均運動量
$$\langle T \rangle = \frac{3}{5} \varepsilon_F = \frac{p_F^2}{2m}$$

 $p_F \sim 200 \,\mathrm{MeV}/c$



広がっている核子 の平均運動量は小 さくなる

> 大学院原子核物理 講談 社サイエンティフィック 中村誠太郎監修より



¹¹ $Li+^{12}C \rightarrow {}^{9}Li+X$ (2中性子分離反応)





(a) ${}^{8}\text{He} + {}^{12}\text{C}$ (b) ${}^{11}\text{Li} + {}^{12}\text{C}$

 $\Delta P \sim 20 - 30 \,\mathrm{MeV}/c$ $\Delta P \cdot \Delta r \sim \hbar$ 不確定性原理

T. Kobayashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **60**, 2599 (1988)









Borromean ring:ルネサンス時代のイタリア貴族ボロメオ家の紋章に由来



理想気体の状態方程式: $PV = Nk_BT = nN_Ak_BT = nRT$ $P = \rho_N k_B T$, $\rho_N = N/V$ 原子核:Fermi粒子の集合体 🛑 有限の大きさ ← 無限に広がっている 核物質 $P = P(\rho_N, T) \to P = P(\rho_N) \longleftrightarrow E = E(\rho_N)$ 中性子 過剰核 対称核物質: Z=N - 有限の密度で安定 中性子物質: A=N - 安定点は存在しない の研究 p性子星になるためには重力が必要