

# 第1章

現在までに知られている素粒子

世代			電荷	スピン	相互作用の種類	スピン	質量	到達距離
レプトン								
レプトン	e	$\mu$	-1	1/2	光子	1	0	$\infty$
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	0	1/2				
クォーク	u	s	+2/3	1/2	グルオン	1	0	$10^{-15} \text{ m}$
	d	c						
	t	b	-1/3	1/2				
	W <sup>±</sup>	Z <sup>0</sup>						
フェルミオン				重力子	重力	2	0	$\infty$
				ボソン				

$\rightarrow$   $q\bar{q}$  ... メソン } ハドロン  
 $qqq$  ... バリオン

... ○ は カラーを持つ粒子

## ① 物質の構造の階層性

原子	$10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ \AA}$	$\sim eV$
原子核	$10^{-14} \text{ m} = 0.1 \text{ fm}$	$\sim \text{MeV}$
核子	$10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$	$\sim 0.1 \text{ GeV}$
	大きさ	エネルギースケール

$\star$  クォーク / レプトン  $\sim 10^{-18} \text{ m}$  以下 (実験により、大きさの上限が与えられる)

## ② 力のくらべ

強い相互作用	0.1	微細構造定数 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\hbar c}$	"重力版" $G_N \frac{m_p^2}{\hbar c} = 6.0 \times 10^{-39}$	重力は素粒子のスケールでは無視できるほど弱い。
電磁相互作用	1/137			
弱い相互作用	$10^{-5}$			
重力相互作用	$10^{-39}$			

$G_N$ : 万有引力定数  
 $m_p$ : 陽子の質量

④ 力の到達距離

弱い相互作用を伝える W-ボソンは極めて重い。およそ 100 GeV とすると、不確定性関係により、

$$\Delta t \Delta E \sim \hbar \Rightarrow c \Delta t \sim \frac{\hbar c}{\Delta E} \sim \frac{200 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{100 \text{ GeV}} = 10^{-18} \text{ m}$$

グルーオンは、グルーオン自身とも相互作用することから、強い相互作用の到達距離も短くなる。

● 対称性と保存則

特に重要な量 —

パリティ	、、、	鏡映対称性。軌道量子数 $l$ なら、 $(-1)^l$ を与える。
Cパリティ	、、、	粒子・反粒子対称性。
アイソスピン	、、、	(後述)

● 実験

顕微鏡としての加速器の分解能  $\Rightarrow$  不確定関係と、ドブロイ波長で決まる。

$$\Delta r \sim \frac{\lambda}{\sin \theta} = \frac{h}{p \sin \theta} = \frac{h}{p}$$

例えば、1 GeV のエネルギーの粒子で物質の内部構造を見る時、

$$\Delta r \sim \frac{\hbar c}{p c} \sim \frac{200 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{1 \text{ GeV}} = 2 \times 10^{-16} \text{ m}$$

(陽子の内部構造が見えるレベル)

1 TeV では  $10^{-18} \text{ m}$  となる。今のところ、加速器の性能が、70-70 の大ま工の上限を現実的に与えている。

● 単位 など

1 Å =  $10^{-10} \text{ m}$

1 fm =  $10^{-15} \text{ m}$

1 eV =  $1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$

覚えておくと便利な量

$\hbar c = 200 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$

$m_e = 511 \text{ keV}$

$\alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\hbar c} \left( = \frac{e^2}{4\pi} \right) = \frac{1}{137}$

$m_p = 940 \text{ MeV}$

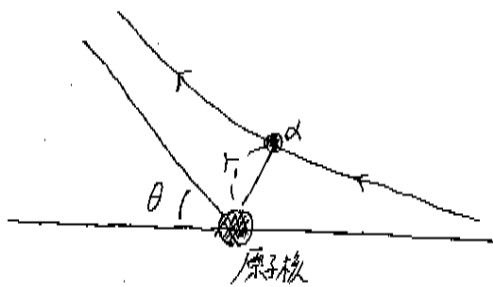
$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

# 第2章

## 2.1 原子とその構成要素

電子	_____	Thomson による比電荷の測定	
原子核	_____	Millikan による素電荷の測定	
		Rutherford 散乱	
┌	陽子	_____	Rutherford による $\alpha$ 粒子を用いた核変換実験で発見
	中性子	_____	Chadwick による実験で発見

### ★ 原子核の大きさの上限



古典的最近接距離は、

$$r_1 = \frac{ze^2}{\frac{1}{2}Mu^2} \left( 1 + \frac{1}{\sin \frac{\theta}{2}} \right)$$

$$M \approx m_\alpha$$

(投算質量) ( $\alpha$  粒子の質量)

例) 5.3 MeV の  $\alpha$  粒子  $\epsilon$ 、Au ( $Z=79$ ) に当てる実験

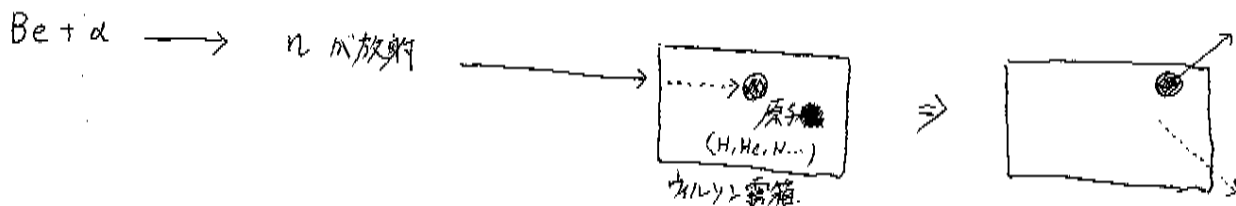
$r_1$  の下限は  $\theta = \pi$  で押さえるから、

$$r_1 \geq \frac{79 \times (4.8 \times 10^{-10})^2 \times 2}{5.3 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-12}} \approx 4.3 \times 10^{-14} \text{ [m]}$$

この値が、原子核の大きさと考えられる。(7-9-2で見よ)

注) 上の計算は CGS。1 [C] =  $c \cdot 10$  , 1 [eV] =  $10^6 / c$

### ★ 中性子の発見



電離箱で中性子は見えないが、原子の軌跡は追えるので、運動学的に放射線(中性子)のエネルギーが推定できる。

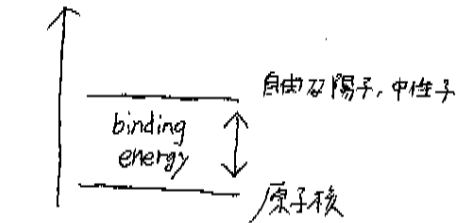
## 2.2 原子核

原子番号 (陽子, 電子数) :  $Z$   
 質量数 (核子数) :  $A$   
 中性子数 :  $N$

原子核の質量は、核子と電子の質量の単なる和ではない。

$$B(Z, A) = \sum M(^1\text{H}) + (A-Z) M_n - M(A, Z) > 0$$

結合エネルギー
陽子の質量 + 電子の質量
中性子の質量
原子核の質量



結合エネルギーは、原子核から核子をひきはずすのに必要なエネルギーをさえる。

結合エネルギーは、主に 2 通りの決め方がある。

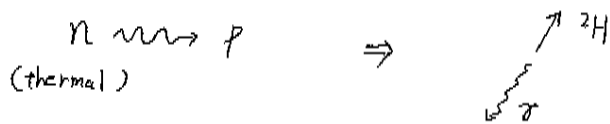
$$V_F = \frac{GM^2}{QR}$$

① 質量分析器を用いる。

$$V_B = \frac{Mv}{QB}$$

電場と磁場中でイオンを走らせ、運動量とエネルギーを測る方法。

② 原子核反応を利用する。



運動学から、

$$\begin{cases} M_D u = E_\sigma / c \\ \frac{1}{2} M_D u^2 \end{cases}$$

$$B(^2\text{H}) = (M_n + M_p - M_{2\text{H}}) c^2 = E_\sigma + \frac{E_\sigma^2}{2M_D c^2}$$

(反跳エネルギー)

\* 熱中性子：分子の熱運動と熱平衡に達し、エネルギーが  $k_B T$  程度に低下した中性子。

室温でのエネルギーは、 $k_B T = \frac{300\text{K} \times 1.4 \times 10^{-23} \text{J/K}}{1.6 \times 10^{-19} \text{J/eV}} \approx 1/40 \text{ eV}$

## 2.3 結合エネルギーのパラメータ化

Weizsäcker の質量公式

$$M(A, Z) = NM_n + ZM_p + Zm_e - B(A, Z)$$

$$B(A, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_a \frac{(N-Z)^2}{4A} - \frac{\delta}{A^{1/2}}$$

体積項
表面項
クーロン項
非対称項
対称エネルギー項

背景となる実験事実

①  $R \propto A^{1/3}$  が成り立つ。

原子核が球形であると仮定すると、(核子の密度) = const となる。  
(密度の飽和性)

②  ${}^4\text{He}$  より重い核では、1核子あたりの結合エネルギーがほぼ一定となる。  
(結合エネルギーの飽和性)

③  $A \geq 60$  の重い核では、結合エネルギーはゆるやかに減少する。  
Aの増加と共に

④ 軽い核では  $N = Z$  が安定であり、より重い核では、中性子過剰さみみの核が安定である。

⑤ 安定核のうち 偶-偶核が 60%、偶-奇核が 40%、奇-奇核は 4%しかない。

“飽和性”  $\Rightarrow$  核力が短距離力であることを示唆している。

(Aの核子の間に長距離力がはたらくとすると、ポテンシャルは  $AC_2 \propto A(A-1) \approx A^2$  に比例するはず。)

① 体積項

(結合エネルギー)  $\propto A$  ①より Aは体積に比例する。

② 表面項

体積項に対する補正項。表面の核子は、中心部の核子より結合は弱いと考えられる。その寄与は、表面積に比例するとし。  $\propto A^{2/3}$

③ クーロン項

原子核を一樣な電荷分布をもった球と仮定すると、静電エネルギーは

$$U = \frac{1}{2} \int \frac{\rho(r_1)\rho(r_2)}{4\pi\epsilon_0|r_1-r_2|} dV_1 dV_2 \quad \text{令 } \rho(r_i) = \rho_0 = (\text{一定})$$

半径  $R$  の一様な球状核電荷分布が、外部に及ぼすポテンシャルは  $\phi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r} = \frac{\rho_0 r^2}{3\epsilon_0}$

であるから、 $U \approx \frac{3}{5} \frac{Z^2 k e^2}{R}$  となる。

以上の3項は、古典的な考察から得られるものであった。

① 非対称項

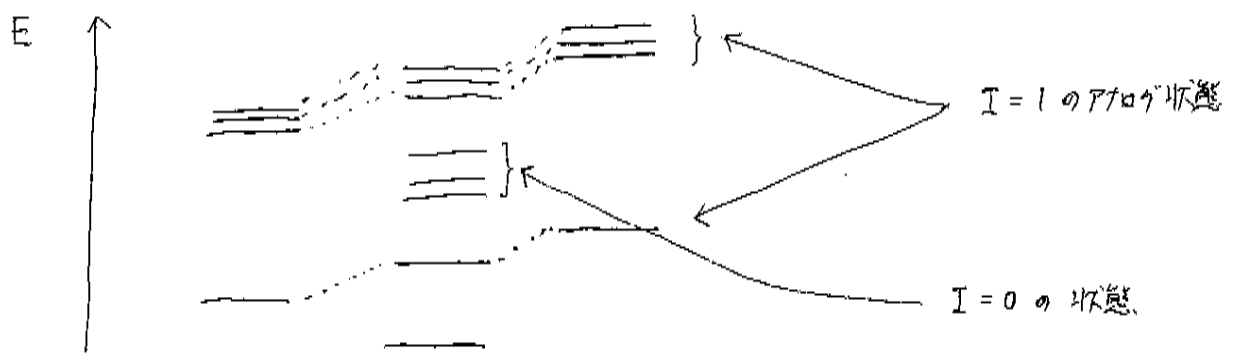
$N = Z$  のときに安定になる傾向がある。よってこの項は、中性子過剰度によって結合エネルギーが弱まる効果を表す。

② 対結合エネルギー項

偶数核が安定であるという傾向をふまえた項。

2.4 核力の荷電独立性及びアイソスピン

\*  $n-n$ ,  $p-p$ ,  $n-p$  間の核力の大きさは等しい。⇒ 荷電独立性。



	$^{14}_6\text{C}$	$^{14}_7\text{N}$	$^{14}_8\text{O}$	
$I_3$	-1	0	1	... I = 1 の 3重項
		0		... I = 0 の 1重項

上の図は、 $^{14}\text{C}$   $^{14}\text{N}$   $^{14}\text{O}$  のアナログ状態が、 $T=0$  相互作用によって分裂したものと見なせる。 $^{14}\text{N}$  に余分な準位があるのは、 $^{14}\text{N}$  だけ、 $I=0$  の 1重項状態をとり得るからである。

\* アナログ状態 (特に、アイソバリックアナログ状態)

アイソスピン量子数は異なるが、他の量子数 (軌道角運動量) は等しい状態たりのこと。(核スピンの、パリティ)