

Dawn of Nuclear Physics

Y Yamaguchi

19 06 2007

化学の時代

19^c - early 20^c

(量子力学以前)

無機化学

有機化学

有機物

合成不可能

生体の不思議な働きによる



人工合成 可能

化学 自然科学の基礎 ("女王")

物理 物体 (質量) の運動を論ずるだけ

cf. 量子力学以後

物理、化学、地学、生物、天文

(宇宙科学)

の基礎

化学

元素

不生不滅

(錬金術の否定)

92種

原子論

面白く後設

Boltzmann

(化学反応
結晶 気体分子
運動論)

原子論の証明

Perrin 1908

Avogadro no の決定

X ray

発見

Laue	1912	Xtal
Bragg	1913	"
Debye Scherrer	1916	紛末

Kelvin

 $h \times$ 比石 \times

太陽は長えらしない

(エネルギー源 電力エネルギー)

Boltzmann

原子論者

放射能

元素は変り得る

1896	U	Becquerel	偶然
1898	Ra P	Curie	3 mg L ₁ R U の 10^6

Big Science のはじまり (予兆)

数トンの U 廃鉱 \rightarrow Ra, Po

3 radioactive series

1903 \rightarrow α , β , γ decays (Rutherford の命名)

exp. decay laws

	radioactivity	Energy spectrum		
1895-98	α decay	line	4He	1909
	β	continuous	e^-	1914
	γ	line	γ	1914

exponential law

radioactive (new) elements } established 1908
 $\alpha = 4\text{He}$ }
 by chemical property and atomic weight



Rutherford -

β -decay $\beta = e^-$
 continuous energy spectrum

J. Chadwick

Verh. d. deutschen Phys. Ges.
 16 (1914) 383

isotopes (1910 Soddy)

nuclei (1911 Rutherford)

α - metallic foil

A even

B-E statistics

A odd

F-D statistics

α -decay theory (1928 Gamow)

Quantum Mechanical Tunnel Effect

γ el mg wave

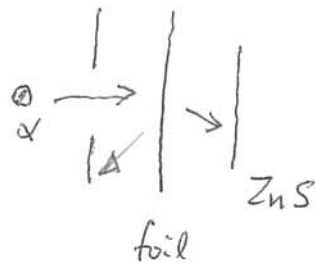
$\lambda \leftarrow \gamma + \text{Xtal}$

Rutherford 1914

1911 Rutherford - Geiger

α + metallic foil

nucleus (\ll atomic size)



135°

長岡元弘

1910 Soddy 同位体

元素 ~~数~~

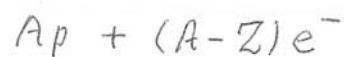
1913 Bohr's atom

色数 A

Xray \rightarrow better Z determination

1919 Aston mass spectrometer

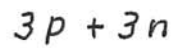
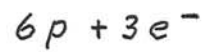
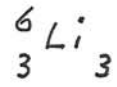
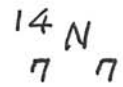
nucleus



Before 1932

nucleus $A p + (A - Z) e^-$

Wrong statistics



composite (bound) system

consisting of A fermions

{	B.E.	even A	integer (spin)
	F.D.	odd A	half odd integer

discovery of n (1932 Chadwick)

$${}^A_Z(\text{nucleus}) = (A - Z)n + Zp$$

(1932 Heisenberg)

Q.M. applicable to

{	nuclei (structure)
	nuclear reactions

theory of α -decay (tunnel effect)

(1928 Gamow)

e^- can not exist in nuclei

R nuclear radius

$$R \approx r_0 A^{1/3}$$

$$r_0 \approx 1.4 \text{ fm}$$

e^- in nucleus

$$p_e \gtrsim \frac{1}{R} \doteq \frac{140 \text{ MeV}}{A^{1/3}} \gg m_e$$

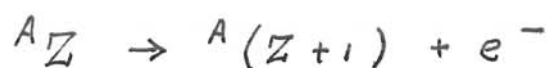
If e^- in a nucleus

$$\text{nuclear mag. mt} \sim \frac{e\hbar}{2m_e c} = \mu_B$$

$$\text{experimentally} \sim \frac{e\hbar}{2m_p c} = \mu_N$$

$$\mu_B / \mu_N = m_p / m_e \sim 1800$$

β -decay (before 1932)



continuous spectrum

(mechanism) different from α -decay

analogous to γ -emission by atoms

and nuclei

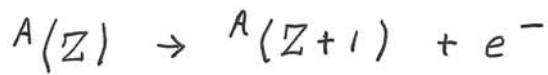
β -particle is produced at the instant of β decay.

(apparent) violation of

{ energy conservation law
{ spin-statistics

β -Decay

(i)



conservation of energy

not valid in individual process

only valid statistically

in the average over a great
number of β -processes

\leftrightarrow N. Bohr Convegno d. Fisica Nucleare
19 (1931)
Faraday Lecture (Journ.
Chem. Soc. 383 (1932))

(background) Quantum Mechanics

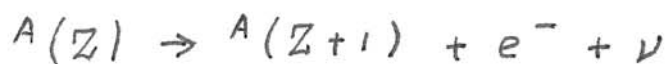
applicable to atoms, molecules, ...

(low energy regions)

not applicable to nuclei

(high energy phenomena
 \gtrsim MeV)

(ii)



W. Pauli

Invited Talk

APS Meeting

Pasadena 1931 June

RMP

title only

Bohr's hypothesis (i)

(th) contradict to energy conservation law
 \Rightarrow to construct a machine for perpetual motion either using β -processes or their inverse.

contradict gravitation theory

L. Landau *Tekhnologii Gudok*
 1001 (1932)

contradict spin-statistics relation

(exptl)

$\exists (E_e)_{max}$

energy conservation is valid for $E_e = (E_e)_{max}$

Ellis and Mott

$$\bar{E}_e = (\Delta M - m_e) c^2 \quad \leftarrow \text{Bohr (i)}$$

\uparrow av. K.E. of e^- \uparrow mass difference between mother and daughter nuclei

		\bar{E}_e	$\Delta M c^2$	$(E_e)_{max}$
artificially produced radioactive nuclei	${}^8\text{Li}$	3.8	> 10.7 MeV	
	${}^{12}\text{Be}$	4	> 10.1 MeV	11.5 MeV

most violently contradict (1936 Bethe)

ν by W. Pauli

1930 Letter Pauli \rightarrow L. Meitner et al.

1931 June APS Meeting at Pasadena
R.M.P. only title

1933 (1st publication)
7^{em} Conseil de Physique Solvay, 1933.

cf

1932 discovery of
 $\left\{ \begin{array}{l} e^+ \\ n \end{array} \right.$

W. Heisenberg ZS. f. Phys. 77 (32) 1
nucleus $(A - Z)n + Zp$

1934 E. Fermi ZS. f. Phys. 88 (34) 161
Theory of β -Decays

W. Pauli and Neutrinos

Pauli conjecture

$$A(Z) \rightarrow A(Z+1) + e^- + \nu$$

$$\nu \quad m(\nu) \ll m(p)$$

electrically neutral

spin 1/2, exclusion principle

Bethe

small mag. mt of $\nu < 10^{-13} e cm$

= 0,02 Bohr magneton



penetration power > 10 x p.p. of γ

could ν be found experimentally?

(Conference in Tübingen)

saved { conservation of energy
angular momentum
spin and statistics

1910 isotopes Soddy
 1911 nucleus Rutherford - Geiger
 1919 mass spectrometer Aston
 1913 Bohr Atomic Model

$Z \leftarrow$ Xray (K)

nuclear mass formula

A

$A^{2/3}$

$(N-Z)^2$

$Z^2 e^2 / A^{1/3}$

even - odd

n-p force

Weizsäcker semi empirical formula

Mottach Flugge の書

§ Nuclear reactions

1st artificial nucl reaction



1928 Gamow

Gurney Condon

QM tunnel effect

α decay

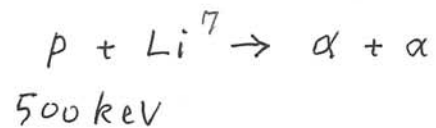
nucl. reaction induced by
charged particles

below Coulomb Barrier

Race for Higher Voltage

1932 Cockcroft Walton

(1934 Arakatsu)



1932 neutron



penetrating
component

Jolio Curie

H.E. γ

X

Chadwick

n

O

Majorana's comment

Rutherford

collapsed H = (pe⁻)

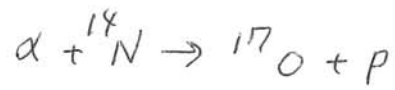
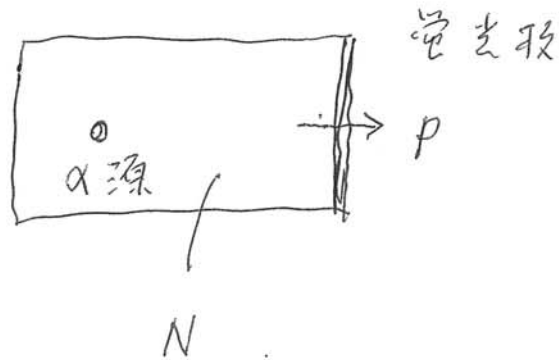
1933



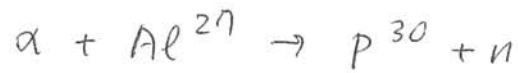
β^+ emitter

人工放射性

1919 Rutherford - ~~Geiger~~



1933 Joliot-Curie ²



B

Mg

artificial radioactivity

β^+ emitter

2 body forces

thermal n

$$\delta/k \doteq -a = \text{const}$$

Fermi
Landau

after war

effective range theory

$$k^{2l+1} \cot \delta_l = -\frac{1}{a} + \frac{1}{2} k^2 r_0 + P r_0^2 k^4 + \dots$$

Lipmann Schwinger

1949

Blatt, Jackson

1949/50

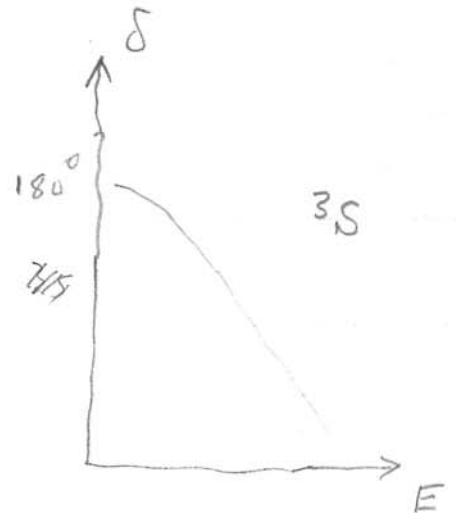
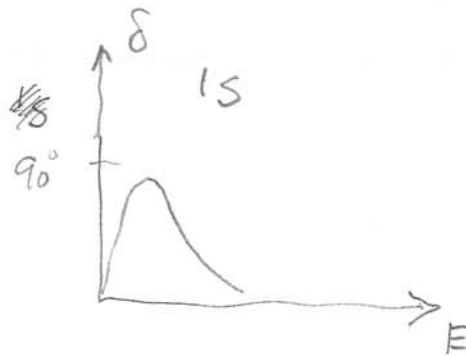
Wigner's limit

↓

$$- "R" \leq \frac{d\delta}{dk} < \infty$$

range

np



resonance



{ C W
V. d. G
Cyclotron

1919
~~1932~~ →

{ mass
spectrometer
→ nucl.
mass

nuclear reactions

p, α , n

new isotopes

Bohr's nucl. model

liquid drop model

Breit-Wigner

resonance

S-matrix

shell model

X

1937 visit of N Bohr to Japan

N の発見

n + 核

共鳴

新 isotopes

n p force

d

§ intermission

- (學生扱) ZnS
ionization chamber
 - 1908 Geiger counter
 - 1911 cloud chamber
(photographic emulsion)
 - 1919 mass spectroscopy
 - 高電圧の発生装置
 - 1932 Cockcroft Walton
Van de Graaf
 - 1930/32 cyclotron
- } Higher Energy

Rutherford の Pet

α -particle

α decay

decay series

exp. law

α -核 崩壊

$\alpha = {}^4\text{He}$ の核



QM

信せ可

UK の nucl. expts

1950's 迄 QM 検証

核力

1932 n 発見

$$n = (pe^-)$$

n = 素粒子

p の相対

isospin

1/2

$$\begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}$$

H

1932

核 (p, n)

n-p force

ordinary

Wigner

exchange

Heisenberg

σ spin

Majorana

σ

p d α , ...

Saturation

$$\langle B_0 E_0 \rangle \sim \text{const}$$

8 $G_0 \leq 1 \text{ MeV}$

1938

$$m_n < m_p + m_e$$

1934

>

Chadwick Goldhaber

1934

Fermi β decay theory

1935

Yukawa

meson theory

1936

N-N Scatt. p-p force

\times >

$$V_{pp} = V_{pn} \quad \frac{1}{5}$$

range

nuclear reactions

formulation

Breit-Wigner resonance
S-matrix

formal th.
n-p, p-p.
new { isotopes
levels

after the war

optical potential
distorted wave
channel coupling

← { nuclear wave functions
nuclear structure

⋮

doorway state

⋮

iso spin

1932 Heisenberg $\begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}$ iso-doublet

1938 Kemmer iso-triplet meson
 $I = 1$

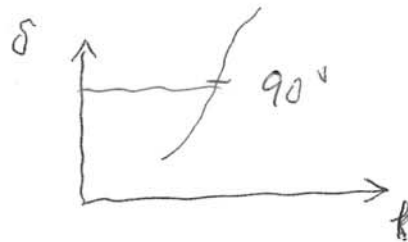
Wigner Super multiplet

~ 1950 Fermi $(SU_2)_{spin} \times (SU_2)_{iso}$
spin

π -N scattering

$I = 1/2$ } $S_{1/2}$ $P_{1/2}$ $P_{3/2}$
 $I = 3/2$ }

$I = 3/2$ $P_{3/2}$ 3-3 resonance



Orear

light nuclear reaction

iso-spin good q. no.

SI iso-spin invariance

中 重核

X isospin

CVC

G_{Fermi} unrenormalized

early 1960's

Feynman

as

Nud. Phys.

corrections

e^2

Ze^2

isobaric analogue states

核力 1932 →

Heitler - London
 H_2^+ , H_2

Heisenberg

n-p exchange force

\hbar , spin

Majorana

\hbar exchange

Wigner

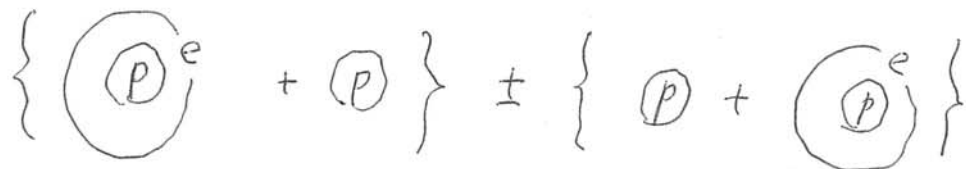
p, d, He, ...

Saturation

exchange force

Heitler - London

H_2^+ ion



$\sqrt{2}$

核力

potential の shape

$\lambda \gg$ force range

short range

Schrödinger eq $r \rightarrow 0$ $1/2$

heavy nuclei shape is $\approx 3 \times 10^{-15}$

中間子論

Yukawa

1935

charged theory

π^\pm の交換 \rightarrow n-p 力の差

p-p

1936

p-p 力の差 (Wigner group)

$$V_{p-p} = V_{pn} \quad 1/5$$

中間子論

symmetrical theory

1938

iso spin 1 の meson field

$\pi^+ \pi^0 \pi^-$

pn iso doublet

$$D \quad \mu_d \neq \mu_p + \mu_n$$

Q

Tensor force

meson theory



V

P_S

N.R. approx

$$1/r^3$$

$$m_V = m_{P_S}$$

V + P_S

Møller Rosenfeld mixture

$$m_V \neq m_{P_S}$$

Schwinger mixture

核力の導出 !

non perturbative

relativistic effect

N-N Scatt. D

short range forces

$$1 \text{ \AA} \approx 10^{-8} \text{ cm}$$

$$\lambda > (\text{range})$$

1

Fermi Theory of β -decay and afterwards

- 1934 E. Fermi Nature rejected
 Ricerca Scient. 2 No.2 (1933)
 ZS. f. Phys 88 (1934) 161
- $G_F (\bar{p} i \gamma_\alpha n) (\bar{e} i \gamma_\alpha \nu)$ V
- 1934 Joliot-Curie artificial radioactivity (β^+)
 1935 Konopinski and Uhlenbeck β^+ emitter
 PR 48 (1935) 7
- $G (\bar{p} \gamma_\alpha n) (\bar{e} \underline{\partial}_\alpha \nu)$ $\frac{\partial V}{\partial t}$
- 1935 207 #00 K-capture Moller 1937
- 1936 G. Gamow and E. Teller G-T transition.
 PR 49 (1936) 895
-
- 1936 Kurie plot PR 49 (1936) 368
- 1937 M. Fierz ZS f Phys 104 (1937) 553
- Fierz term
 (allowed)
 tr. $(G_V^* G_T + c.c.) \frac{1}{E_e}$
 $(G_S^* G_A + c.c.) \frac{1}{E_e}$
- 1937 M. Fierz Helv. Phys. Acta 10 (1937),
 123, 284
- K. U $\partial_\alpha \nu \rightarrow$ difficulty
 in 2nd Quantization
- 1936 H.A. Bethe and R.F. Bacher RMP 8 (1936) 82
 esp. 184-205
- S V T A P
- 1939 Allen et al $He^6 \rightarrow Li^6 + e^- + \nu$ T

$e\nu$ angular correlation

$$1 + \lambda \frac{v_e}{c} \cos \theta_{e\nu}$$

	λ
S	-1
V	+1
A	-1/3
T	+1/3

Allen et al 1949

PR 75 570

T

Fission

- 1938 Meitner - Hahn
- 1938 Meitner - Fische fission (命名)
- 1939 Bohr - Wheeler (after war spent. fission th)
- 1940 U^{238} SF 10^{16} yrs
nucl. reactor patent
(Joliot-Curie
Kowarsky

Fermi et al

Manhattan Proj

A bomb

reactor

many new isotopes

→ application

理工鬼匠

n diffusion

cross sections

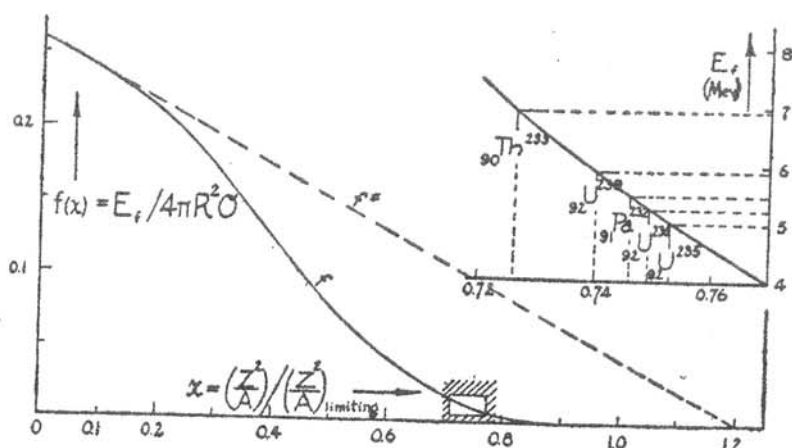


FIG. 4. The energy E_f required to produce a critical deformation leading to fission is divided by the surface energy $4\pi R^2\sigma$ to obtain a dimensionless function of the quantity $x = (\text{charge})^2 / (10 \times \text{volume} \times \text{surface tension})$. The behavior of the function $f(x)$ is calculated in the text for $x=0$ and $x=1$, and a smooth curve is drawn here to connect these values. The curve $f^*(x)$ determines for comparison the energy required to deform the nucleus into two spheres in contact with each other. Over the cross-hatched region of the curve of interest for the heaviest nuclei the surface energy changes but little. Taking for it a value of 530 Mev, we obtain the energy scale in the upper part of the figure. In Section IV we estimate from the observations a value $E_f \sim 6$ Mev for U^{239} . Using the figure we thus find $(Z^2/A)_{\text{limiting}} = 47.8$ and can estimate the fission barriers for other nuclei, as shown.

will moreover have the smallest possible value for a displacement of the form $P_2(\cos \theta)$. To find the deformation for which the potential energy has reached a maximum and is about to decrease, we have to carry out a more accurate calculation. We obtain for the distortion energy, accurate to the fourth order in α_2 , the expression

$$\begin{aligned} \Delta E_{S+E} = & 4\pi r_0^2 \sigma A^{\frac{2}{3}} [2\alpha_2^2/5 + 116\alpha_2^3/105 \\ & + 101\alpha_2^4/35 + 2\alpha_2^2\alpha_4/35 + \alpha_4^2] \\ & - 3(Ze)^2/5r_0 A^{\frac{2}{3}} [\alpha_2^2/5 + 64\alpha_2^3/105 \\ & + 58\alpha_2^4/35 + 8\alpha_2^2\alpha_4/35 + 5\alpha_4^2/27], \quad (22) \end{aligned}$$

in which it will be noted that we have had to include the terms in α_4^2 because of the coupling which sets in between the second and fourth modes of motion for appreciable amplitudes

Shell model

pre-war

unpopular

∴ Bohr's picture on nuclei
(liq. drop model)

Manhattan Proj.

many new isotopes

Spin, parity, mag. mt Q -mt

β decays



shell model

(at least for) g.s.

1948 Maria Goeppert Mayer

1948 J. H. D. Jensen, Haxel, Sues

magic no. 20 28 50 82 126

shell orbit + small residual interactions
→ configuration mixing

theoretical justification of shell model

1931 Bohm - Pines

1954 - Brueckner, --- Bethe, ---

{ one body motion
 self consist. field

exp. verification

1951 (d,p) (d,n) and inverse

S. T. Butler

Bethe exptl test of shell orbit

Q large Q (\Rightarrow single particle Q)

1952 Rainwater

Bohr - Mottelson

deformed shell model (Nilsson model)

collective coordinates

Nuclei largely deformed ,
far from stability, ... }

New closed shell

of $j = l + \frac{1}{2}$ are filled by one particle each and later the $2l$ states of $j = l - \frac{1}{2}$. The level sequence, as modified by strong spin-orbit coupling, is shown in Fig. IV.3.

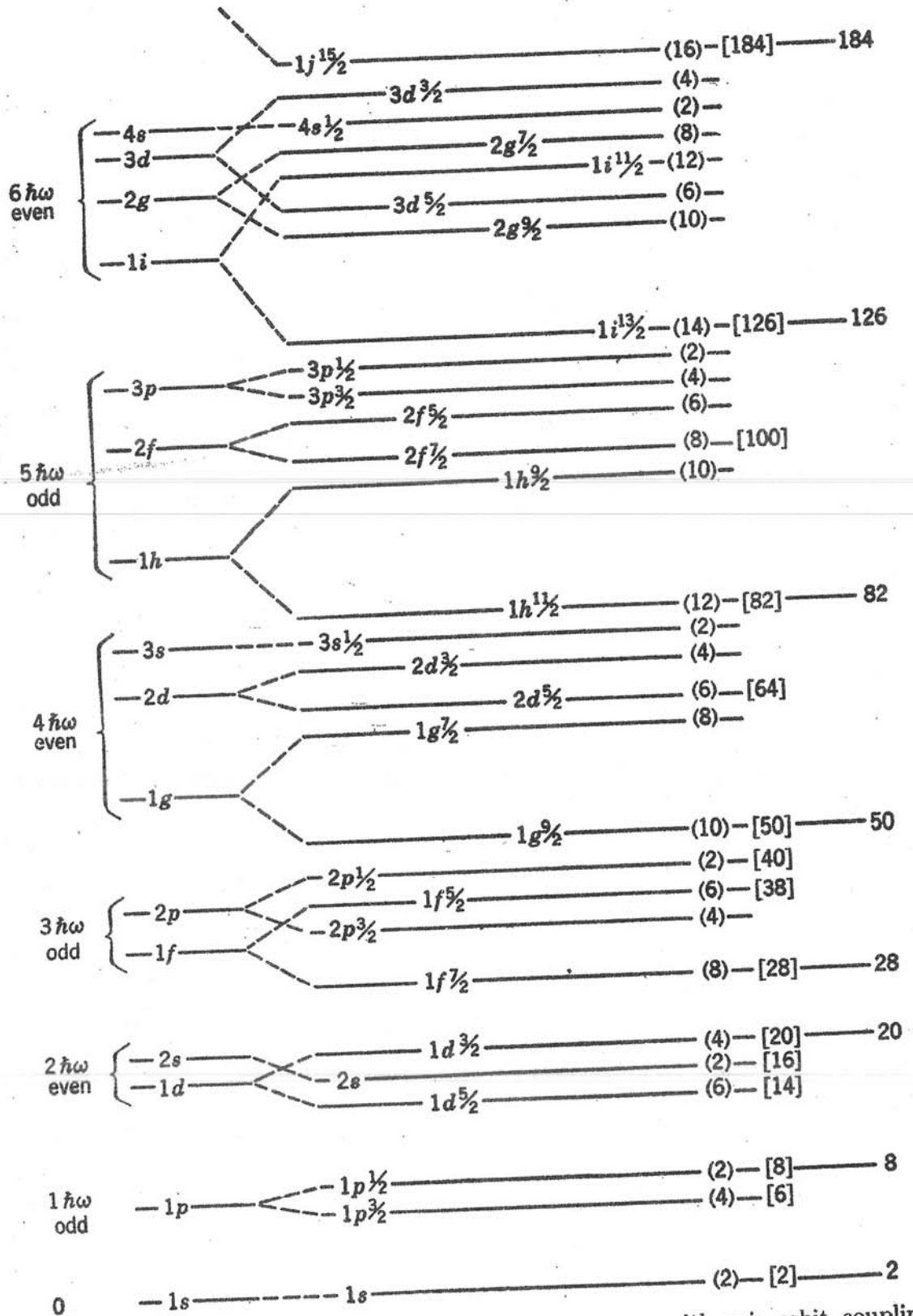


Fig. IV.3. Schematic diagram of nuclear level systems with spin-orbit coupling.

となり, 図 62 (b), あるいは図 63 のようになる. 今度は n, l が異なれば E_{nl} は異なった値をとる. この場合も魔法の数のうち 2, 8, 20 は閉殻として説明できるが, それ以外は残念ながら合わない.

調和振動子ポテンシャルから井戸形ポテンシャルへ移行すると, 最初の 1s, 1p 準位を除いて, 他の準位はすべて l の大きいものが下になり, l が小さくなるにしたがって順次

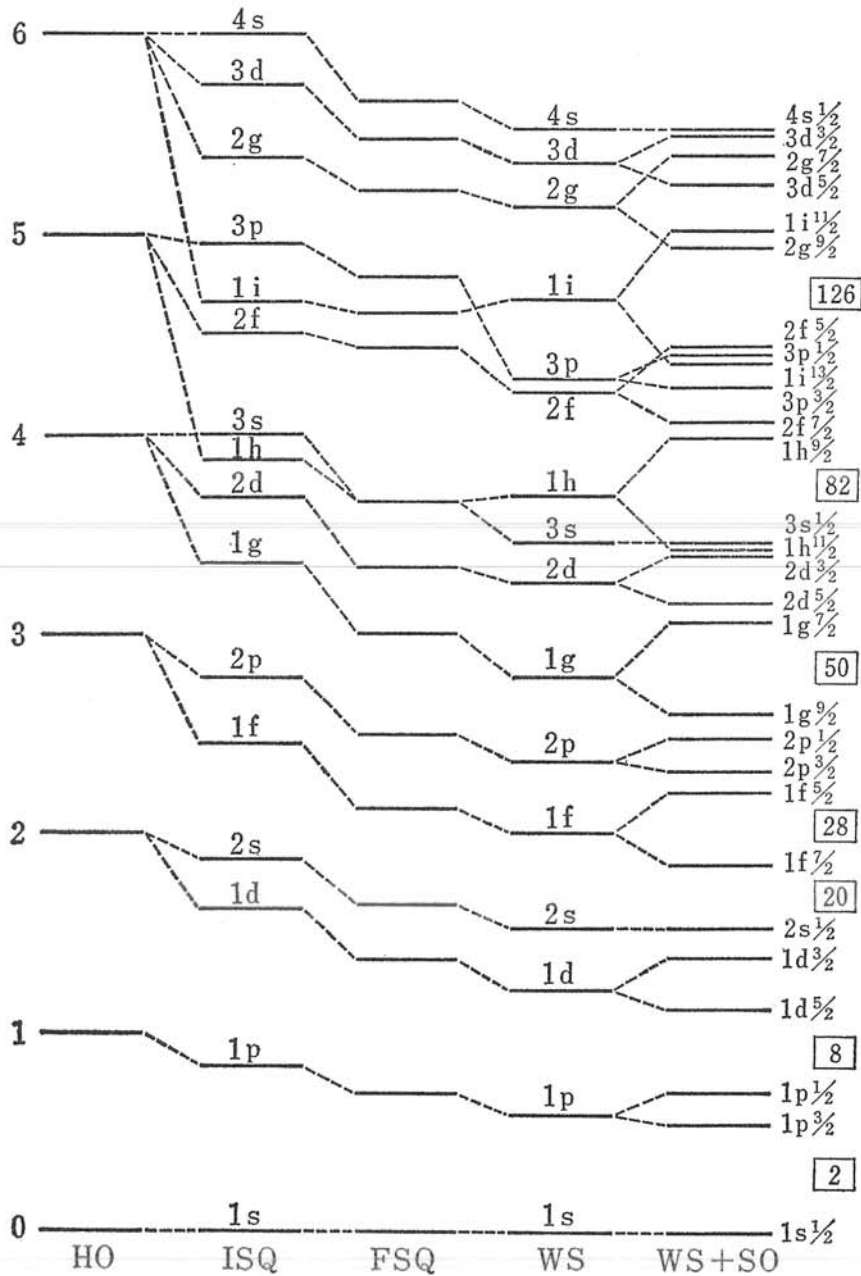


図 63 各種の 1 体ポテンシャルによるエネルギー準位 (HO は調和振動子形, ISQ は無限に高い井戸形, FSQ は有限の深さの井戸形, WS はウッズ・サクソン形, WS+SO は WS プラス スピン軌道結合ポテンシャル)

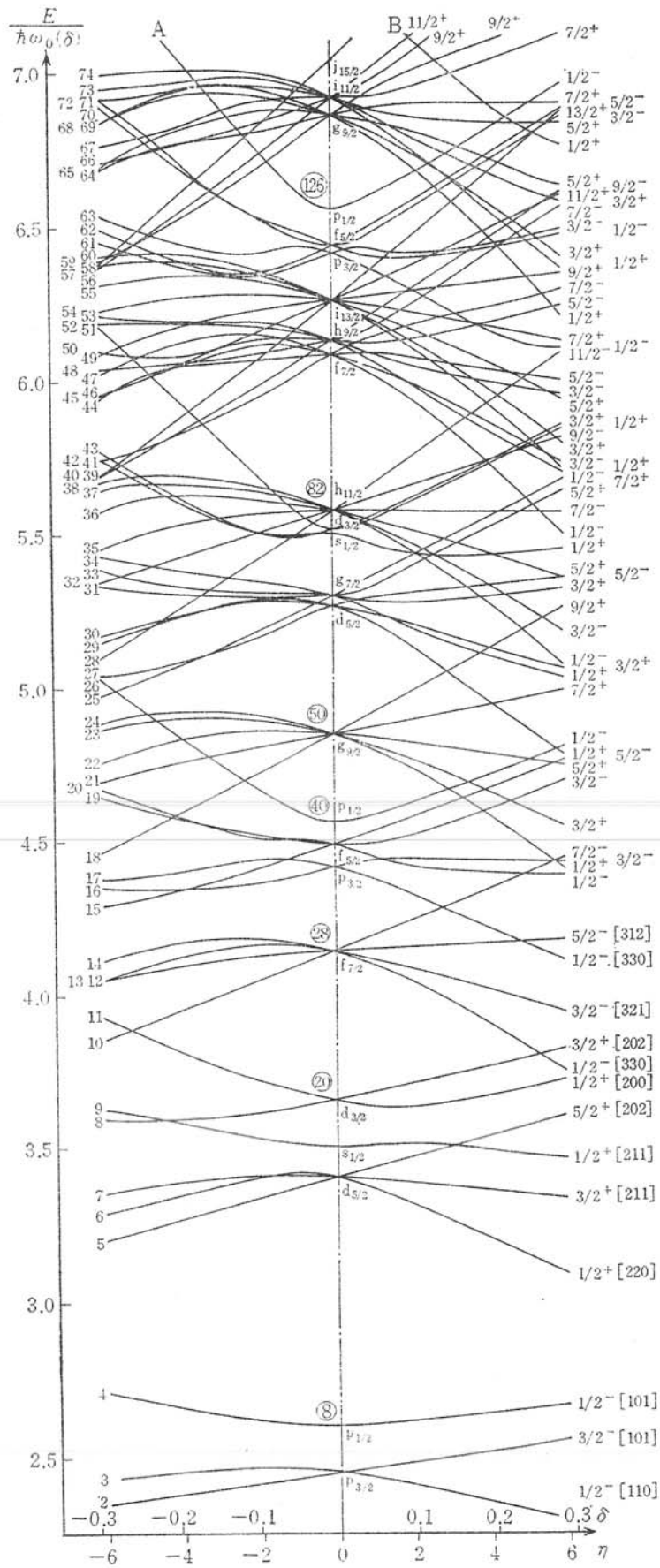


図 4.2 Nilsson 模型での 1 粒子準位(Nilsson, S. G.(1955)による). 準位の右にその準位の Q とパリティを示した. なお, 準位を $[Nn_{\perp}A]$ で示すことがある. これはポテンシャルが非常に球形からずれた, 軸対称振動子型になった場合に相当する '漸近的' 量子数である. N は振動の全量子数, n_{\perp} は対称軸に垂直な節面の数である. 参考のために, 下の方の準位について $[Nn_{\perp}A]$ をあわせて記した.

理研

阪大

1917

榮足

1922

長岡研, 西川研... 榮足

1931

仁科研 榮足

1934

11月17

CW 完成 200 keV_p

湯川 中間子論

D-D neutrons

1935

長岡・西川・仁科研 合同

原子核実験 開始

サイクロトロン

CW (西川研)

} 建設開始

1937

3月

阪大サイクロ 完成

4月 理研サイクロ 完成 (26")

(28")

6月 理研 CW 始動

1943

理研大サイクロ 完成 (60")

1945

11 23

米軍 サイクロ 投棄

台北 (荒勝 研)

台北大 P S 3 年 12 月 5 日

1928 Geiger counter 手 づ くり 7 u 2 C.C. 製作

1934 (S 9) 7 月 25 日 CW $p + Li \rightarrow 2\alpha$

280 keV

台北で lecture

Li は ら く し て

仁科, 菊池

台北 訪問

$DD \rightarrow n$

京大 (荒勝 研)

京大 P S 11 8 月 5 日

1940 S 15 新 CW 建設

500 keV $p + Li \rightarrow 1.7 \text{ MeV } \gamma$

$p + F \rightarrow 6.3 \text{ MeV } \gamma$

戦時中 サイクロ 建設

↓

U photo fission

1951 S 26 核実験 閉禁

1955 S 30 末 今 P 分の サイクロ 始動

日 本 理 論

n-p d $\tau \pi^+ \pi^0, \dots$
n scatt capture $\pi^+ \pi^-$ $\pi^+ \pi^-$
 $0 \rightarrow 0$ C^{12} O^{16} $2 \pi^+ \pi^-$
 $e^+ e^-$ Opp. Schwinger

shell model $\pi^+ \pi^-$
 $\pi^+ \pi^-$

1937 Bohr's visit to Japan
clash shell model
meson theory

1937 May μ track in CC
Anderson Neddelmeyer
April Bohr \dots $\pi^+ \pi^-$

cf 1939 Bohr Fission
Telephone to other Univ USA
1938 - Preprint Europ \rightarrow Japan
1 month
1950's Tel. BNL UCRA \dots

polarization

beam

100 - 300 MeV pp c.s.

target

better accelerators

SF

Tandem

better instrumentation

light ion heavy ion accelerators

computer

πN 33 resonance

\approx 1950

H, E Phys } separation
Nuc. Phys }

物理学上のおもな発明および発見 (5)

年 代	事 項	発明または発見者(生国)
1893	ウィーンの変位法則……………	ウィーン(独)
1895	運動物体の電磁光学理論……………	ローレンツ(オランダ)
1895	X線……………	レンチェン(独)
1895	陰極線が負電荷を運ぶことの証明……………	ペラン(仏)
1895	キュリーの法則(磁性)……………	キュリー(仏)
1896	ウラニウムの放射能……………	ベクレル(仏)
1896	ゼーマン効果……………	ゼーマン, ローレンツ(オランダ)
1897	電子の存在確認……………	トムソン(英)
1897	無線電信……………	マルコーニ(イタリア)
1898	ラジウム……………	キュリー夫妻(仏, ポーランド)
1900	輻射論, 作用量子……………	プランク(独)
1900	金属電子論……………	ドルーデ(独)
1901	熱電子……………	リチャードソン(英)
1902	統計力学の確立……………	ギブス(米)
1902	翼の揚力の理論……………	クッタ(独)
1903	放射性元素の崩壊説……………	ラザフォード(英), ソディー(英)
1903	電子の質量の速度による変化……………	カウフマン(独)
1904	原子模型の理論……………	長岡半太郎(日)
1905	特殊相対性理論……………	アインシュタイン(独)
1905	光量子仮説……………	”
1905	常磁性の理論……………	ランジュバン(仏)
1906	熱力学第三法則……………	ネルンスト(独)
1906	固体比熱の理論……………	アインシュタイン(独)
1907	翼の揚力の理論……………	ジューコフスキー(ロシア)
1907	陽極線分析……………	トムソン(英)
1907	分子磁場, 磁区概念……………	バイス(仏)
1907	四次元時空世界の概念……………	ミンコフスキー(ロシア)
1908	ヘリウムの液化……………	カーメルリング・オンネス(オランダ)
1908	計数管の製作……………	ラザフォード(英), ガイガー(独)
1908	分子の実在性の証明……………	ペラン(仏)
1908	α 粒子=ヘリウム原子核を実証……………	ラザフォード(英), ロイズ(英)
1909	油滴法による電子電荷の測定……………	ミリカン(米)
1910	同位体の概念……………	ソディー(英)
1911	霧箱の発明……………	C. T. R. ウィルソン(英)
1911	超伝導……………	カーメルリング・オンネス(オランダ)
1911	原子核の存在……………	ラザフォード(英)

物理学上のおもな発明および発見 (6)

年 代	事 項	発明または発見者(生国)
1911-12	宇宙線の発見	ヘス(オーストリア)
1912	結晶による X 線の回折	ラウエ(独) <i>Bragg Debye Scherrer</i>
1913	原子構造の量子論	N. ボーア(デンマーク) <i>Bohr</i>
1913	シュタルク効果	シュタルク(独)
1913	原子番号と元素の固有 X 線の関係	モーズリ(英)
1913	放射性崩壊の変位則	{ ソディ(英) { ファヤンス(ポーランド)
1914	原子のエネルギー準位	フランク(独), ヘルツ(独)
1915	一般相対性理論	アインシュタイン(独)
1915	水素スペクトルの微細構造理論	ゾンマーフェルト(独)
1916	粉末結晶による X 線の分析法	{ デバイ(オランダ) { シェラー(スイス)
1916	X 線スペクトル, 原子価の理論	コッセル(オランダ)
1918	対応原理	ボーア(デンマーク)
1919	質量分析器による同位体研究	アストン(英)
1919	α 粒子による原子核破壊	ラザフォード(英)
1919	バルクハウゼン効果	バルクハウゼン(独)
1921	原子の磁気能率	シュテルン(独), ゲルラッハ(独)
1922	コンプトン効果	コンプトン(米)
1923	物質波概念	ド・ブロイ(仏)
1924	ボース・アインシュタイン統計	{ ボース(インド) { アインシュタイン(独)
1925	電子スピン	{ ハウトシュミット(オランダ) { ユーレンベック(オランダ)
1925	排他原理	パウリ(オーストリア)
1925	行列力学	ハイゼンベルク(独)
1925	要素過程の保存則	{ コンプトン(米), シモン(米), { ガイガー(独), ボーテ(米)
1926	波動力学	シュレーディンガー(独)
1926	フェルミ統計	フェルミ(イタリア)
1927	不確定性原理	ハイゼンベルク(独)
1927	電子線の回折	{ デヴィソン(米), ジャーマー(米), { G. P. トムソン(英)
1927	水素共有結合の量子論	ハイトラー(独), ロンドン(米)
1927	ヘリウム II	ケーソム(オランダ)
1927	相補性原理	ボーア(デンマーク)

物理学上のおもな発明および発見 (7)

年 代	事 項	発明または発見者(生国)
1928	強磁性体の理論	ハイゼンベルク(独)
1928	金属電子の量子論	ブロッホ(スイス)
1928	相対論的電子方程式	ディラック(英)
1928	α 崩壊の理論, トンネル効果	ガモフ(ソ連)
1928	ラマン効果	ラマン(インド)
1929	相対論的場の量子論	{ ハイゼンベルク(独) {パウリ(オーストリア)
1929	宇宙線シャワー	スコベルチン(ソ連)
1929	統一場の理論	アインシュタイン(独)
1929	ハッブルの膨張法則	ハッブル(米)
1930	サイクロトロン	{ ローレンス(米) {リビングストン(米)
1931	半導体の理論	A. H. ウィルソン(英)
1931	ニュートリノ仮説	パウリ(オーストリア)
1931	電子顕微鏡	クノル(独), ルスカ(独)
1931	不可逆過程における相反定理	オンサーガー(米)
1931	宇宙電波	ジャンスキー(米)
1932	中性子	チャドウィック(英)
1932	陽電子	アンダーソン(米)
1932	重水素の分離	ユーリー(米)
1932	高電圧加速装置で原子核人工転換	{ コッククロフト(英) {ウォルトン(アイルランド)
1933	β 崩壊の理論	フェルミ(イタリア)
1933	超伝導体の完全反磁性	{ マイスナー(独) {オクセンフェルト(独)
1934	人工放射能	ジョリオ・キュリー夫妻(仏)
1934	位相差顕微鏡	ゼルニケ(オランダ)
1934	チェレンコフ効果	チェレンコフ(ソ連)
1935	中間子論	湯川秀樹(日)
1937	宇宙線中間子	{ アンダーソン(米) {ネッダーマイヤー(米)
1938	反強磁性	ビゼット(仏)ら
1938	ウランの核分裂	ハーン(独), シュトラスマン(独)
1939	核反応による星の熱源の説明	ベーテ(独)
1939	磁気共鳴法	ラビ(米)
1940	超ウラン元素(Np)の創製	マクミラン(米), アベルソン(米)

物理学上のおもな発明および発見 (8)

年 代	事 項	発明または発見者(生国)
1941	ベータトロン製作	カースト(米)
1941	量子流体力学	ランダウ(ソ連)
1942	強誘電性	ヒッペル(米)
1942	核分裂連鎖反応の持続	フェルミ(イタリア)ら
1944	ヘリウムII内の第2音波	ペシュコフ(ソ連)
1945	電子スピン共鳴法	ザボイスキー(ソ連)
1945	シンクロトロン	{ マクミラン(米) { ベクスラー(ソ連)
1946	核磁気共鳴	ブロッホ(スイス), パーセル(米)
1946	ビッグバン理論	ガモフ(米)
1946	^{14}C 年代測定法	リビー(米)
1947	2種の間接子の存在	パウエル(英)
1947	V粒子発見	ローチェスター(英), バトラー(英)
1947	ラム・シフト	ラム(米)
1948	ホログラフィーの理論	ゲイバー(英)
1948	くりこみ理論	{ 朝永振一郎(日) { シュウインガー(米)
1948	中間子の人工的創製	ガードナー(米), ラッテス(ブラジル)
1948	核の殻構造論(マジック数)	M. G. メイヤー(独)
1948	トランジスター	{ ブラッティン(米), バーディーン { (米), ショックレー(米)
1948	フェリ磁性	ネール(仏)
1948	固体における中性子散乱	シャル(米)
1949	磁区の直視	ボゾース(米)
1930-50	磁性の理論	バン・ブレック(米)
1949-59	新粒子(Λ , Σ , Ξ , K)発見	パウエル(英), アンダーソン(米)ら
1951-53	原子核の集団運動	{ A. ボーア(デンマーク) { レインウォーター(米), モッテルソン(米)
1953	泡箱	グレイサー(米)
1954	メーザーの発明	タウンズ(米)ら
1954	中性子非弾性散乱	ブロックハウス(カナダ)
1955	反陽子の創製	セグレ(イタリア)
1956	反中性子の確認	ピッチオーニ(イタリア)ら
1957	パリティの非保存	リー(中), ヤン(中), ウ(中)
1957	超伝導の理論	バーディーン(米)ら
1957	メスバウアー効果	メスバウアー(独)

物理学上のおもな発明および発見 (9)

年 代	事 項	発明または発見者(生国)
1957	不規則系における拡散の不在……………	アンダーソン(英)
1957	不可逆過程の理論……………	久保亮五(日)
1958	半導体におけるトンネル効果……………	江崎玲於奈(日)
1959	電子反ニュートリノの実証……………	ライネス(米)
1960	レーザーの製作……………	マイマン(米)
1960	素粒子の励起状態……………	カリフォルニア大グループ(米)
1960	超伝導体におけるトンネル効果……………	ギェバー(ノルウェー)
1960	ニュートリノ・ビーム……………	{ レダーマン, シュバルツ, シュタインバーガー(米)
1961	超電導マグネットの製作……………	クンツラー(米)
1962	2種のニュートリノ……………	ブルックヘブン研究所グループ
1962	超伝導体のトンネル接合……………	ジョセフソン(英)
1962	X線星……………	ロッシ(米)ら
1964	クォーク理論……………	ゲルマン(米)ら
1964	希薄合金の電気抵抗の理論……………	近藤 淳(日)
1965	3K宇宙背景放射……………	ペンジャス(米), ウィルソン(米)
1967	パルサー……………	ヒュウイッシュ(英)
1967	統一理論……………	ワインバーグ(米), サラム(パキスタン)
1968	マルチワイヤー比例計数箱……………	シャルパック(仏)
1968	電子の深非弾性散乱(クォークの検証)	フリードマン, ケンドール, テイラー(米)
1969-73	非晶質の電子論……………	モット(英)
1972	^3He の超流動……………	{ リー, リチャードソン, オシェロフ(米)
1973	第3世代クォーク, レプトンの予言…	小林 誠, 益川敏英(日), カビボ(伊)
1974	新粒子(J/ ψ)の発見……………	リヒター(米), ティン(米)
1975	τ 粒子の発見……………	パール(米)
1980	量子ホール効果の発見……………	フォン・クリッツィング(独)ら
1981	走査トンネル顕微鏡……………	ビニツヒ, ローラー(スイス)
1983	W, Z粒子の発見……………	ルビア(スイス)ら
1986	酸化物超伝導体の発見……………	ベドノルツ, ミュラー(スイス)

表 3. 2 年代測定に用いられる崩壊系列と熱生成率.

親元素	娘元素	崩壊産物	崩壊定数 (y^{-1})	半減期 (y)	熱生成率 ($W\ kg^{-1}$)
^{238}U	^{206}Pb	$8\alpha+6\beta$	1.55×10^{-10}	4468×10^6	9.4×10^{-5}
^{235}U	^{207}Pb	$7\alpha+4\beta$	9.85×10^{-10}	704×10^6	5.7×10^{-4}
^{232}Th	^{208}Pb	$6\alpha+4\beta$	4.95×10^{-11}	14010×10^6	2.7×10^{-5}
^{87}Rb	^{87}Sr	β	1.42×10^{-11}	48800×10^6	
^{147}Sm	^{143}Nd	α	6.54×10^{-12}	106000×10^6	
^{40}K	$\left\{ \begin{array}{l} ^{40}Ca \\ ^{40}Ar \end{array} \right.$	β	4.96×10^{-10}	1400×10^6	2.8×10^{-5}
		電子捕獲	5.81×10^{-11}	11900×10^6	
^{39}Ar	^{39}K	β	2.57×10^{-3}	269	
^{176}Lu	^{176}Hf	β	1.94×10^{-11}	35000×10^6	
^{187}Re	^{187}Os	β	1.52×10^{-11}	45600×10^6	
^{14}C	^{14}N	β	1.21×10^{-4}	5730	

radioactivity

→ geological age determination

astronomy → astrophysics

stellar energy source

{ QM → stellar situation
White dwarf

Bethe

Weizsäcker

CN cycle

戦後

p-p chain

r-process

s-process

neutron star

Oppenheimer Volkoff

origin of elements

thermo equilibrium

戦後 発度

cold n

$\alpha\beta\gamma$

early univ.

stellar cooking

SN