



原子核の

スピン・アイソスピン

パリティ



原子核のスピンのアイソスピン・パリティ

YAMAGATA UNIVERSITY

粒子の性質
質量
電荷
スピン
アイソスピン

Nuclear Wallet Cards

Nuclide	Z	El	A	J π	Δ (MeV)	T $\frac{1}{2}$, Γ , or Abundance	Decay Mode
0 n	0	n	1	1/2+	8.071	10.24 m 2	β^-
1 H	1	H	1	1/2+	7.289	99.985% 1	
	2		2	1+	13.136	0.015% 1	
	3		3	1/2+	14.950	12.32 y 2	β^-
	4		4	2-	25.9	4.6 MeV 9	n
	5		5		32.9	5.7 MeV 21	n
	6		6	(2-)	41.9	1.6 MeV 4	n
	7		7		49s	29 \times 10 ⁻²³ y 7	
2 He	2	He	3	1/2+	14.931	0.000137% 3	
	4		4	0+	2.425	99.999863% 3	
	5		5	3/2-	11.39	0.60 MeV 2	α , n
	6		6	0+	17.595	806.7 ms 15	β^-
	7		7	(3/2)-	26.10	150 keV 20	n
	8		8	0+	31.598	119.0 ms 15	β^- , β^- -n 16%
	9		9	(1/2-)	40.94	65 keV 37	n
	10		10	0+	48.81	0.17 MeV 11	2n?
3 Li	3	Li	3		29s	unstable	p?
	4		4	2-	25.3	6.03 MeV	p
	5		5	3/2-	11.68	\approx 1.5 MeV	α , p
	6		6	1+	14.087	7.59% 4	
	7		7	3/2-	14.908	92.41% 4	
	8		8	2+	20.947	838 ms 6	β^- , β^- - α
	9		9	3/2-	24.954	178.3 ms 4	β^- , β^- -n 50.8%
	10		10	(1-, 2-)	33.05	1.2 MeV 3	n
	11		11	3/2-	40.80	8.59 ms 14	β^- , β^- - α 0.027%, β^- -n
	12		12		50.1s	<10 ns	n?
4 Be	4	Be	5	(1/2+)	38s	?	p
	6		6	0+	18.375	92 keV 6	p, α
	7		7	3/2-	15.770	53.22 d 6	ϵ
	8		8	0+	4.942	6.8 eV 17	α
	9		9	3/2-	11.348	100%	
	10		10	0+	12.607	1.51 \times 10 ⁶ y 6	β^-
	11		11	1/2+	20.174	13.81 s 8	β^- , β^- - α 3.1%
	12		12	0+	25.08	21.49 ms 3	β^- , β^- -n \leq 1%
	13		13	(1/2-)	33.25	2.7 \times 10 ⁻²¹ s 18	n
	14		14	0+	40.0	4.84 ms 10	β^- , β^- -n 94%, β^- -2n 6%
	15		15		49.8s	<200 ns	n?
	16		16	0+	57.7s	<200 ns	2n?
B	5	B	6		43.6s	unstable	2p?
	7		7	(3/2-)	27.87	1.4 MeV 2	p, α
	8		8	2+	22.921	770 ms 3	ϵ , ϵ - α
	9		9	3/2-	12.416	0.54 keV 21	p,
	10		10	3+	12.051	19.8% 3	
	11		11	3/2-	8.668	80.2% 3	
	12		12	1+	13.369	20.20 ms 2	β^- , β^- - α 1.58%
	13		13	3/2-	16.562	17.33 ms 17	β^-
	14		14	2-	23.66	12.5 ms 5	β^- , β^- -n 6.04%
	15		15		28.97	9.93 ms 7	β^- , β^- -n 93.6%, β^- -2n 0.4%

Nuclide	Z	El	A	J π	Δ (MeV)	T $\frac{1}{2}$, Γ , or Abundance	Decay Mode
0 n	0	n	1	1/2+	8.071	10.24 m 2	β^-
1 H	1	H	1	1/2+	7.289	99.985% 1	
	2		2	1+	13.136	0.015% 1	
	3		3	1/2+	14.950	12.32 y 2	β^-
	4		4	2-	25.9	4.6 MeV 9	n
	5		5		32.9	5.7 MeV 21	n
	6		6	(2-)	41.9	1.6 MeV 4	n
	7		7		49s	29 \times 10 ⁻²³ y 7	



とはいえ、

スピシ

ってなんだ？

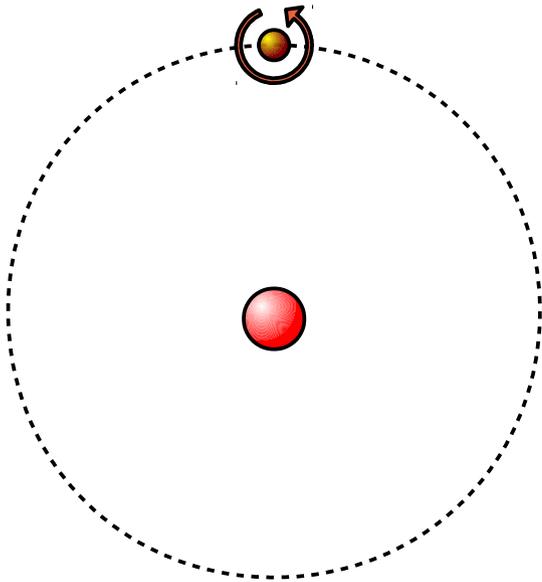


電子の「スピン」の発見

YAMAGATA UNIVERSITY

1925年 ジョージ・ウーレンベック、サミュエル・ゴーズミット
電子が『自転』しながら、原子核のまわりを回る事を仮定

電子の自転を『**スピン**』と命名



地球のまわりを月が『自転』しながら『公転』
太陽のまわりを地球が『自転』しながら『公転』
するように、

原子核のまわりを電子が『自転』しながら、
電子軌道上を『公転』

⇒ 原子の構造を非常にうまく説明できる。

電子が『自転』すると、一体なにが起きるのか？

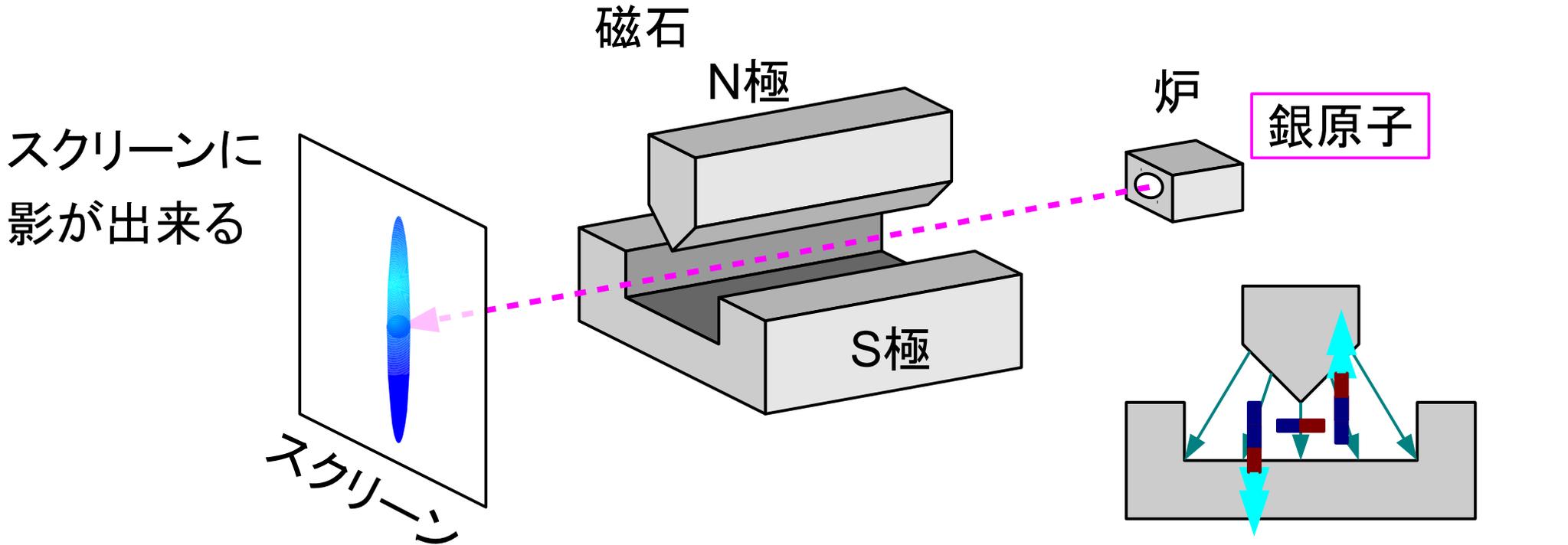


電子磁気モーメントの測定

YAMAGATA UNIVERSITY

1922年 シュテルン=ゲルラッハの実験
量子化された電子の磁気モーメントの発見

銀の原子の磁気モーメント
= 電子の磁気モーメント



スクリーンにはどのような影ができるか？

予想 電子の磁気モーメントは電子の『スピン』で生まれる
電子は様々な大きさ・向きの『スピン』をしている

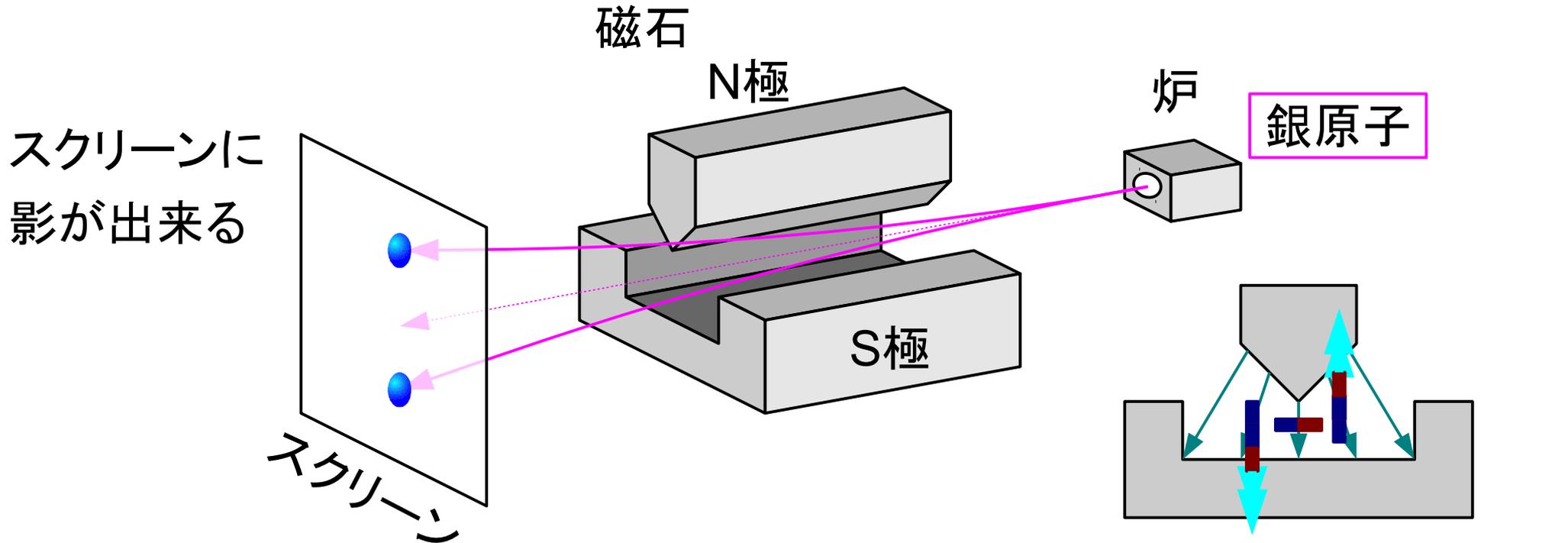


量子化された電子の磁気モーメント

YAMAGATA UNIVERSITY

1922年 シュテルン=ゲルラッハの実験
量子化された電子の磁気モーメントの発見

銀の原子の磁気モーメント
= 電子の磁気モーメント



結果
陰は上下『二つ』に分離

磁気モーメントの値は2種類のみ

電子は離散的な磁気モーメントを持つ
→ 量子化された『磁気モーメント』
→ 量子化された電子『スピン』

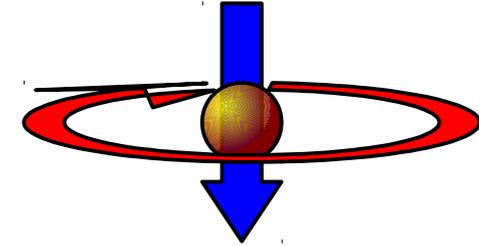
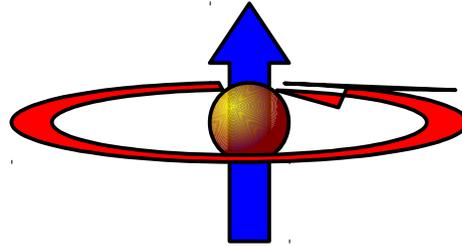
磁石の向きで、力が変化



電子のスピン：量子化された自転

YAMAGATA UNIVERSITY

『スピン』が『二つ』の状態をとるということは



回転方向

右回り

左回り

『スピン』の向き
(右ネジ)

上向き

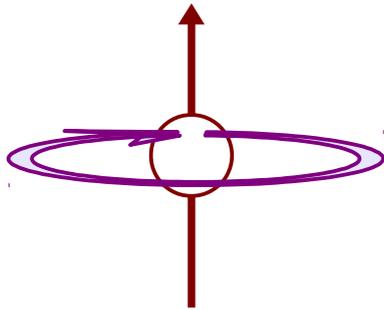
下向き

『スピン』の値

- ・ スピンの値の差 $1 + \frac{1}{2}$
- ・ 2成分

$$-\frac{1}{2}$$

電子の磁気モーメント と スピン



$$\vec{\mu}_e = g \frac{-e}{2 m_e \hbar} \vec{S}$$

- * * 電荷をもつ物体の自転 → 磁気能率
- * * 量子化された”自転”

⇒ $-1/2$ と $+1/2$

⇒ 下向き 上向き

⇒ スピンの大きさは $1/2$



量子力学・量子統計

整数スピンをもつ粒子

- ・ ボーズ粒子
- ・ 粒子の交換に対して対称
- ・ 同じエネルギー準位を複数の粒子で占める事ができる

半整数スピンをもつ粒子

- ・ フェルミ粒子
- ・ 粒子の交換に対して反対称
- ・ 同じエネルギー準位の重複は許されない **パウリの排他律**

元素周期表

Periodic Table of the Elements

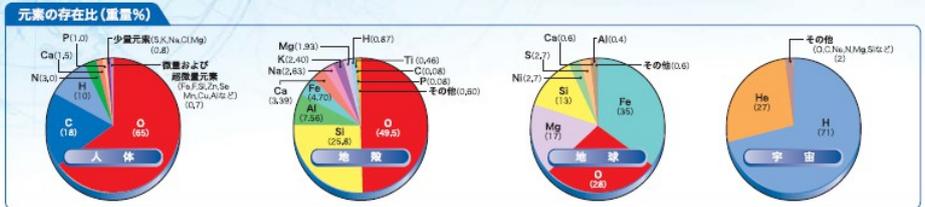
自然も暮らしもすべて元素記号で書かれている



メンデレーエフ (Dmitrii Ivanovich Mendeleev, 1834~1907)
1869年、ロシアのベラルーブルグ大学の化学者メンデレーエフは、当時知られていた63種類の元素を(1)原子量の順に並び、(2)酸や塩素と結合してできる物質の組成(たとえば、ナトリウムはNaCl、マグネシウムはMgCl₂をつくる)などの性質が同様に変化する法則「周期律」を見出し、性質が似た元素が同じ列にくるように配列した「周期表」をつくった。その名の通りは「周期」が動いて、場所が動いてはなかった。この性質を予言した。当初はメンデレーエフの周期表は注目されなかったが、1875年にリウヴィムが、1880年にギルマウツがそれぞれ、それらの性質が彼の予言のとおりであった。世界的に信頼された。現在は周期表は、すべての人が用いる化学や物理学の基本となっている。

18
He
ヘリウム 4.003
2 Helium

宇宙空間に最も多く存在する元素。太陽の中心部では、ヘリウムが核融合反応の燃料として消費されている。地球の大気中にはごく微量のヘリウムが存在している。



1
H
水素 1.008
1 Hydrogen

宇宙空間に最も多く存在する元素。太陽の中心部では、水素が核融合反応の燃料として消費されている。地球の大気中にはごく微量の水素が存在している。

2
Li Be
リチウム 6.941
3 Lithium
ベリリウム 9.012
4 Beryllium

リチウム: 電池の電極材料として広く利用されている。ベリリウム: 航空機や宇宙機の部品に使用される。

3
Na Mg
ナトリウム 22.99
11 Sodium
マグネシウム 24.31
12 Magnesium

ナトリウム: 食塩の成分として不可欠。マグネシウム: 骨の形成に重要な役割を果たす。

4
K Ca
カリウム 39.10
19 Potassium
カルシウム 40.08
20 Calcium

カリウム: 人間の体内で最も多いミネラル。カルシウム: 骨の主要成分。

5
Rb Sr
ルビウム 85.47
37 Rubidium
ストロンチウム 87.62
38 Strontium

ルビウム: 原子時計の標準物質。ストロンチウム: 蛍光灯の発光物質。

6
Cs Ba
セシウム 132.9
55 Cesium
バリウム 137.3
56 Barium

セシウム: 最も重い安定な元素。バリウム: 造影剤として使用される。

7
Fr Ra
フランシウム 223
87 Francium
ラジウム 226
88 Radium

放射能を持つ元素。発見されたのは1898年。

8
Ac
アクチニウム 227
89 Actinium

放射能を持つ元素。発見されたのは1898年。

3
Ti
チタン 47.88
22 Titanium

航空機や宇宙機の部品に使用される。

4
Zr
ジルコニウム 91.22
40 Zirconium

原子力発電機の燃料棒に使用される。

5
Hf
ハフニウム 178.49
72 Hafnium

原子力発電機の燃料棒に使用される。

6
La
ランタニウム 138.91
57 Lanthanum

原子力発電機の燃料棒に使用される。

7
Th
トリウム 232.04
90 Thorium

放射能を持つ元素。発見されたのは1828年。

5
V
バナジウム 50.94
23 Vanadium

航空機や宇宙機の部品に使用される。

6
Cr
クロム 52.00
24 Chromium

耐食性に優れた金属。

7
Mn
マンガン 54.94
25 Manganese

鉄鋼の強化剤として使用される。

8
Fe
鉄 55.85
26 Iron

地球上で最も多い金属元素。

9
Co
コバルト 58.93
27 Cobalt

原子力発電機の燃料棒に使用される。

10
Ni
ニッケル 58.69
28 Nickel

原子力発電機の燃料棒に使用される。

11
Cu
銅 63.55
29 Copper

電気伝導性に優れた金属。

12
Zn
亜鉛 65.38
30 Zinc

原子力発電機の燃料棒に使用される。

13
Al
アルミニウム 26.98
13 Aluminum

地球上で最も多い金属元素。

14
Si
シリコン 28.09
14 Silicon

半導体材料として広く利用されている。

13
B
硼 10.81
5 Boron

ガラスやセラミックスの原料。

14
C
炭素 12.01
6 Carbon

生命の基礎となる元素。

15
N
窒素 14.01
7 Nitrogen

大気中に最も多く存在する元素。

16
O
酸素 15.99
8 Oxygen

地球上で最も多く存在する元素。

17
F
フッ素 18.99
9 Fluorine

最も電陰性が高い元素。

18
Ne
ネオン 20.18
10 Neon

稀有ガス元素の一種。

19
Ar
アルゴン 39.95
18 Argon

稀有ガス元素の一種。

20
Kr
クリプトン 83.80
36 Krypton

稀有ガス元素の一種。

21
Sc
スカンジウム 44.96
21 Scandium

原子力発電機の燃料棒に使用される。

22
Ti
チタン 47.88
22 Titanium

航空機や宇宙機の部品に使用される。

23
V
バナジウム 50.94
23 Vanadium

航空機や宇宙機の部品に使用される。

24
Cr
クロム 52.00
24 Chromium

耐食性に優れた金属。

25
Mn
マンガン 54.94
25 Manganese

鉄鋼の強化剤として使用される。

26
Fe
鉄 55.85
26 Iron

地球上で最も多い金属元素。

27
Co
コバルト 58.93
27 Cobalt

原子力発電機の燃料棒に使用される。

28
Ni
ニッケル 58.69
28 Nickel

原子力発電機の燃料棒に使用される。

29
Cu
銅 63.55
29 Copper

電気伝導性に優れた金属。

30
Zn
亜鉛 65.38
30 Zinc

原子力発電機の燃料棒に使用される。

31
Ga
ガリウム 69.72
31 Gallium

半導体材料として広く利用されている。

32
Ge
ゲルマニウム 72.64
32 Germanium

半導体材料として広く利用されている。

33
As
アセニウム 74.92
33 Arsenic

半導体材料として広く利用されている。

34
Se
セレン 78.96
34 Selenium

半導体材料として広く利用されている。

35
Br
臭素 79.90
35 Bromine

消毒剤として広く利用されている。

36
Kr
クリプトン 83.80
36 Krypton

稀有ガス元素の一種。

37
Rb
ルビウム 85.47
37 Rubidium

原子時計の標準物質。

38
Sr
ストロンチウム 87.62
38 Strontium

蛍光灯の発光物質。

39
Y
イットリウム 88.91
39 Yttrium

原子力発電機の燃料棒に使用される。

40
Zr
ジルコニウム 91.22
40 Zirconium

原子力発電機の燃料棒に使用される。

41
Nb
ニオブ 92.91
41 Niobium

原子力発電機の燃料棒に使用される。

42
Mo
モリブデン 95.94
42 Molybdenum

原子力発電機の燃料棒に使用される。

43
Tc
テクネチウム 98.91
43 Technetium

放射性元素。発見されたのは1937年。

44
Ru
ルテチウム 101.07
44 Ruthenium

原子力発電機の燃料棒に使用される。

45
Rh
ロジウム 101.07
45 Rhodium

原子力発電機の燃料棒に使用される。

46
Pd
パラジウム 106.42
46 Palladium

原子力発電機の燃料棒に使用される。

47
Ag
銀 107.87
47 Silver

貴金属の一種。

48
Cd
カドミウム 112.41
48 Cadmium

有毒元素。発見されたのは1817年。

49
In
インジウム 114.82
49 Indium

半導体材料として広く利用されている。

50
Sn
スズ 118.71
50 Tin

半導体材料として広く利用されている。

51
Sb
アンチモン 121.76
51 Antimony

半導体材料として広く利用されている。

52
Te
テルル 127.60
52 Tellurium

半導体材料として広く利用されている。

53
I
ヨウ素 126.91
53 Iodine

甲状腺ホルモンの成分。

54
Xe
キセノン 131.29
54 Xenon

稀有ガス元素の一種。

55
Cs
セシウム 132.91
55 Cesium

最も重い安定な元素。

56
Ba
バリウム 137.33
56 Barium

造影剤として使用される。

57
La
ランタニウム 138.91
57 Lanthanum

原子力発電機の燃料棒に使用される。

58
Ce
セリウム 140.12
58 Cerium

原子力発電機の燃料棒に使用される。

59
Pr
プラセオジム 140.91
59 Praseodymium

原子力発電機の燃料棒に使用される。

60
Nd
ネオジム 144.24
60 Neodymium

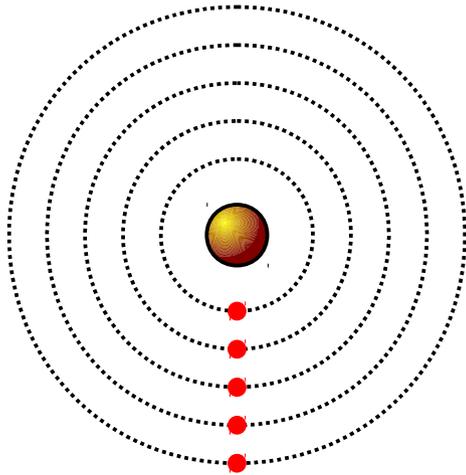
原子力発電機の燃料棒に使用される。

文部科学省のホームページからダウンロード可 「一家に一枚周期表」



原子の『殻構造』

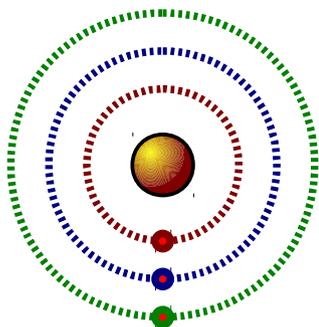
YAMAGATA UNIVERSITY



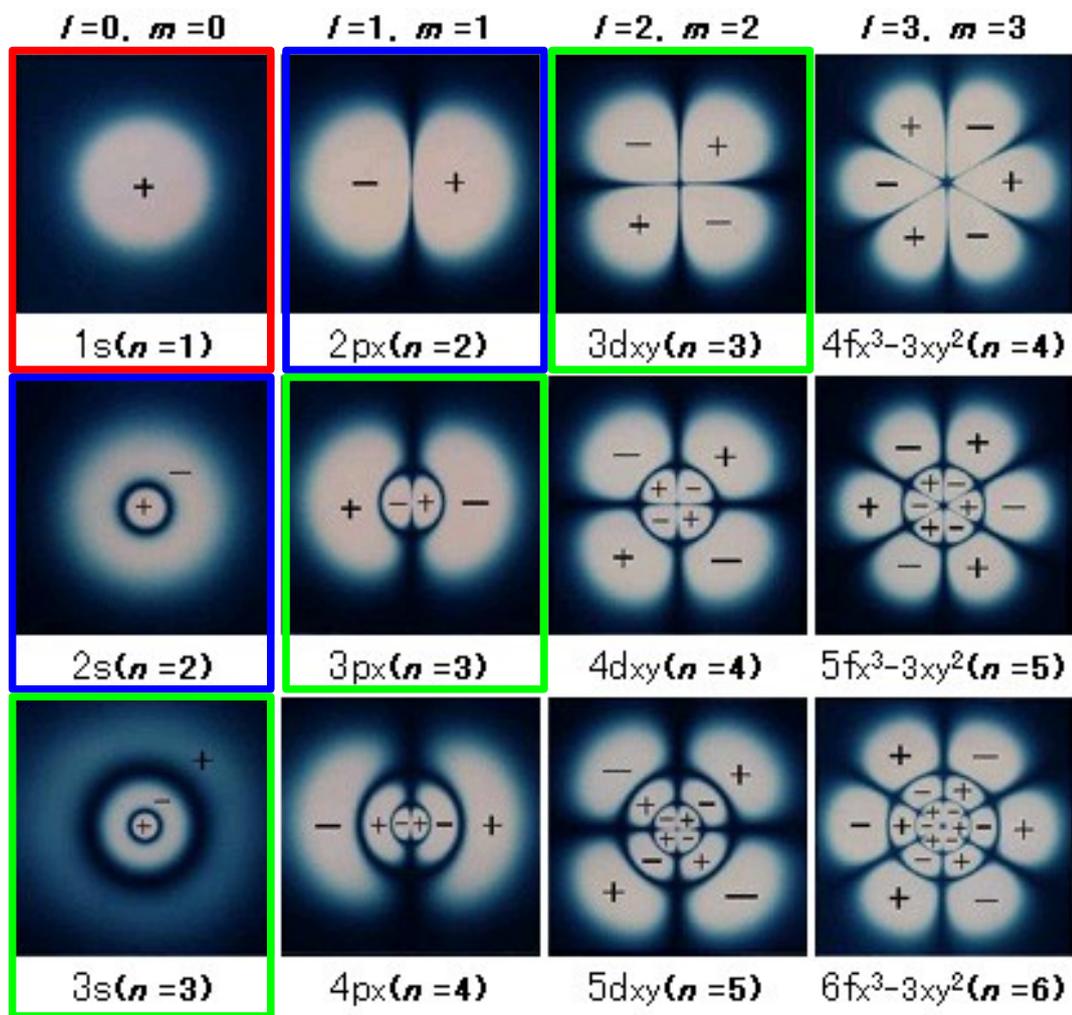
量子数	殻	軌道
1	K殻	1s
2	L殻	2s, 2p
3	M殻	3s, 3p, 3d
4

電子は原子の『殻』に存在する

『殻』には複数の『軌道』がある



量子数	殻	軌道
1	K殻	1s
2	L殻	2s, 2p
3	M殻	3s, 3p, 3d
4	



軌道 s p d f

量子数	殻	軌道
1	K殻	1s
2	L殻	2s, 2p
3	M殻	3s, 3p, 3d
4	

『準位』

1s⁰ 1 個

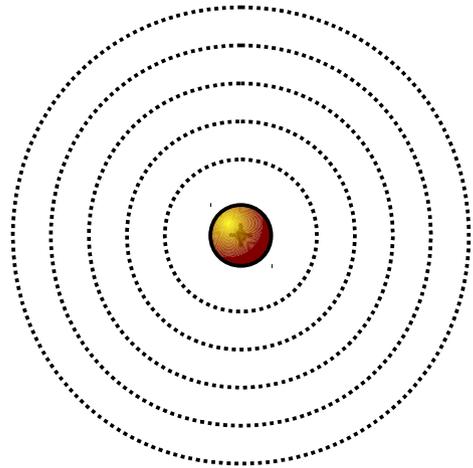
2s⁰, 2p⁻¹, 2p⁰, 2p¹ 1 + 3 = 4 個

3s⁰, 3p⁻¹, 3p⁰, 3p¹, 3d⁻², 3d⁻¹, 3d⁰, 3d¹, 3d²

1 + 3 + 5 = 9 個

詳しく見ると

- | | 『準位』の数 |
|---|----------|
| ▪ s軌道: s ⁰ | 1個 |
| ▪ p軌道: p ⁻¹ , p ⁰ , p ¹ | 3個 |
| ▪ d軌道: d ⁻² , d ⁻¹ , d ⁰ , d ¹ , d ² | 5個 |
| ▪ | |
| ▪ l 番目の軌道 | 2l + 1 個 |



量子数	殻	軌道	電子の数=『準位』×2
1	K殻	1s	→ 2個
2	L殻	2s 2p	→ 8個
3	M殻	3s 3p 3d	→ 18個

殻には量子数の軌道が存在する。
(s軌道から順に)

l 番目の軌道には $2l + 1$ 個の『準位』がある

『準位』には上向き、下向きスピンの
2個の電子が入る

原子には原子番号の数、電子が存在



『エネルギー準位の低い』殻から順に埋めていく

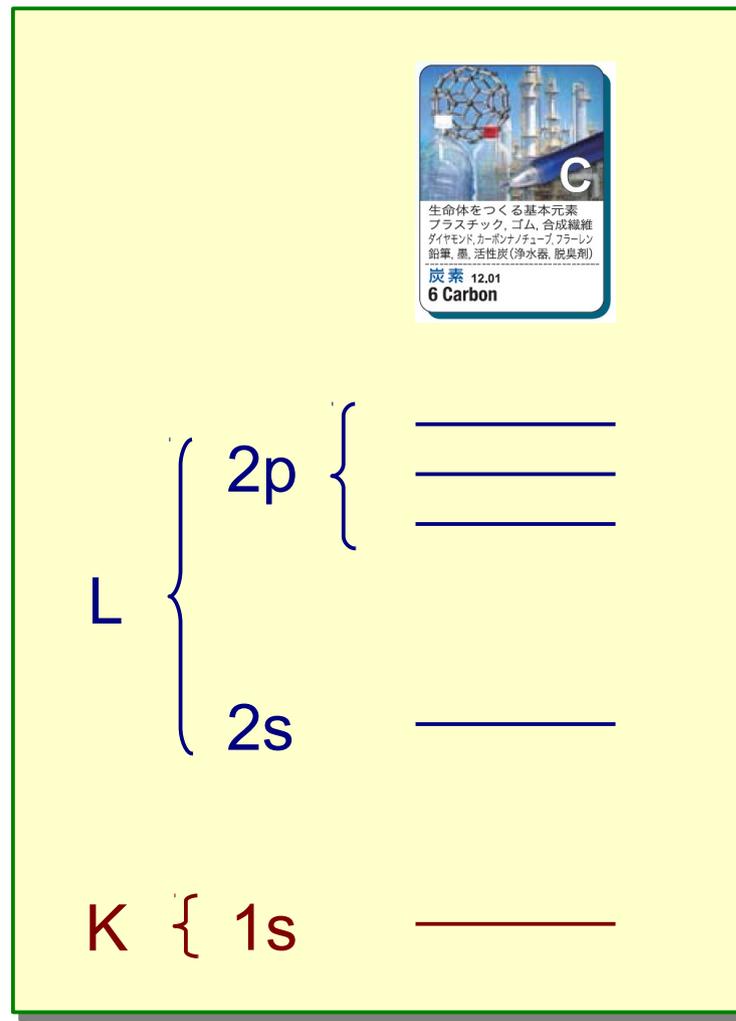
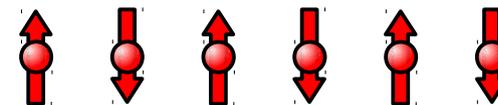


量子数	殻	軌道	『準位』の数	電子の数
1	K殻	1s	1	$1 * 2 = 2$
2	L殻	2s, 2p	$1 + 3 = 4$	$4 * 2 = 8$
3	M殻	3s, 3p, 3d	$1 + 3 + 5 = 9$	$9 * 2 = 18$

軌道のエネルギー準位



炭素(原子番号6)



元素の周期律と電子軌道



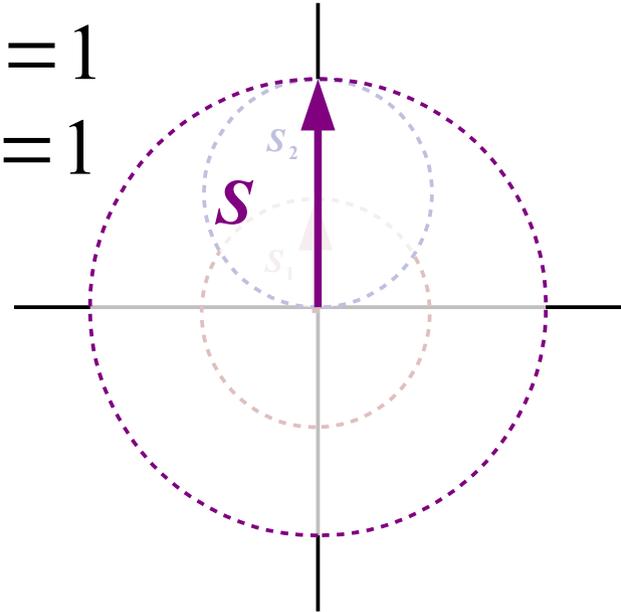


スピンの足し算: $\mathbf{S} = \mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2$

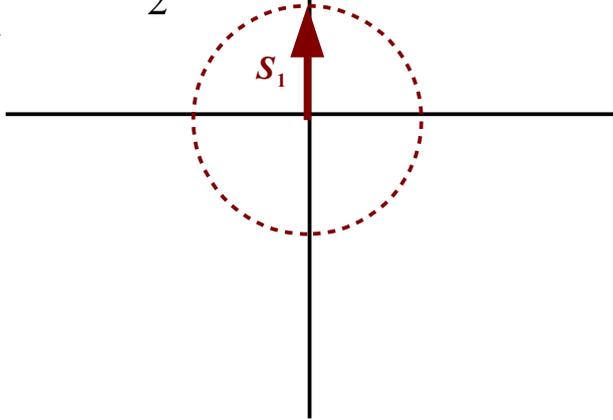
YAMAGATA UNIVERSITY

$$|\mathbf{S}_1| = \frac{1}{2} \quad |\mathbf{S}_2| = \frac{1}{2} \quad \text{の場合}$$

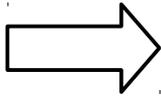
$$\begin{cases} |\mathbf{S}| = 1 \\ S_z = 1 \end{cases}$$



$$\begin{cases} |\mathbf{S}_1| = \frac{1}{2} \\ S_{1z} = +\frac{1}{2} \end{cases}$$

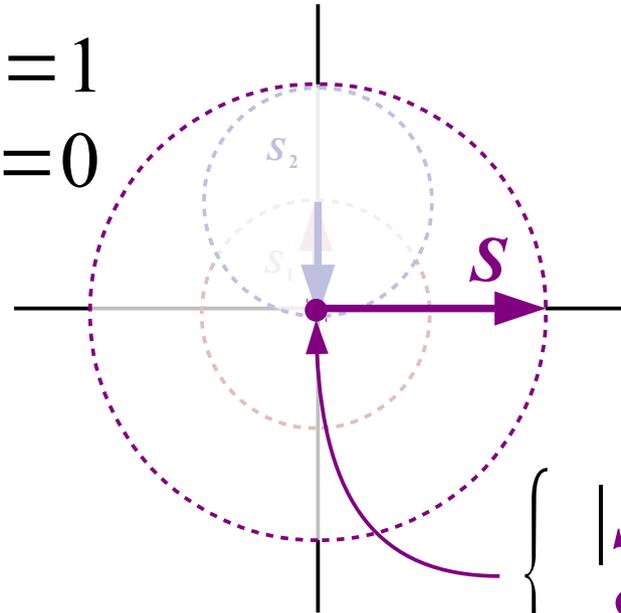


$$\begin{cases} |\mathbf{S}_1| = \frac{1}{2} \\ S_{1z} = +\frac{1}{2} \end{cases}$$



$$\begin{cases} |\mathbf{S}_1| = \frac{1}{2} \\ S_{1z} = -\frac{1}{2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} |\mathbf{S}| = 1 \\ S_z = 0 \end{cases}$$



一般的には:

$$|\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2| \leq |\mathbf{S}| \leq |\mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2|$$

の範囲の整数値または半整数値をとる

$$\begin{cases} |\mathbf{S}| = 0 \\ S_z = 0 \end{cases}$$

36. CLEBSCH-GORDAN COEFFICIENTS, SPHERICAL HARMONICS, AND d FUNCTIONS

Note: A square-root sign is to be understood over every coefficient, e.g., for $-8/15$ read $-\sqrt{8/15}$.

Notation:

J	J	...
M	M	...
m_1	m_2	
m_1	m_2	Coefficients
⋮	⋮	
⋮	⋮	

$1/2 \times 1/2$

1		
+1	1	0
+1/2+1/2	1	0
+1/2 -1/2	1/2	1/2
-1/2 +1/2	1/2	-1/2
-1/2 -1/2	1	

$$Y_1^0 = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \cos \theta$$

$$Y_1^1 = -\sqrt{\frac{3}{8\pi}} \sin \theta e^{i\phi}$$

$$Y_2^0 = \sqrt{\frac{5}{4\pi}} \left(\frac{3}{2} \cos^2 \theta - \frac{1}{2} \right)$$

$$Y_2^1 = -\sqrt{\frac{15}{8\pi}} \sin \theta \cos \theta e^{i\phi}$$

$$Y_2^2 = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{15}{2\pi}} \sin^2 \theta e^{2i\phi}$$

$2 \times 1/2$

5/2	5/2	3/2
+5/2	1	+3/2+3/2
+2	+1/2	1
+2 -1/2	1/5	4/5
+1 +1/2	4/5 -1/5	5/2
		3/2

+1 -1/2	2/5	3/5	5/2	3/2
0 +1/2	3/5	-2/5	-1/2	-1/2

0 -1/2	3/5	2/5	5/2	3/2
-1 +1/2	2/5	-3/5	-3/2	-3/2

-1 -1/2	4/5	1/5	5/2
-2 +1/2	1/5	-4/5	-5/2

$3/2 \times 1/2$

2	2	1
+3/2 +1/2	1	+1
+3/2 -1/2	1/4	3/4
+1/2 +1/2	3/4 -1/4	2
		1

+3/2 -1/2	1/4	3/4	2	1
+1/2 +1/2	3/4 -1/4	0	0	

+1/2 -1/2	1/2	1/2	2	1
-1/2 +1/2	1/2	-1/2	-1	-1

-1/2 -1/2	3/4	1/4	2
-3/2 +1/2	1/4	-3/4	-2

-3/2 -1/2	1		
-----------	---	--	--

2×1

3	3	2
+3	1	+2
+2	0	1/3
+1	1	2/3
		2/3
		-1/3
		3
		2
		1

$3/2 \times 1$

5/2	5/2	3/2
+5/2	1	+3/2+3/2
+3/2	0	2/5
+1/2	1	3/5
		-2/5
		5/2
		3/2
		1/2

+3/2 -1	1/10	2/5	1/2
+1/2	0	3/5	1/15
-1/2	1	3/10	-8/15
		1/6	5/2
		-1/2	3/2
		-1/2	-1/2

+1/2 -1	3/10	8/15	1/6
-1/2	0	3/5	-1/15
-3/2	1	1/10	-2/5
		1/2	-3/2
		-3/2	-3/2

-1/2 -1	3/5	2/5	5/2
-3/2	0	2/5	-3/5
		-5/2	

+2	1	1/15	1/3	3/5
+1	0	8/15	1/6	-3/10
0	1	2/5	-1/2	1/10
		3	2	1
		0	0	0

+3/2 -1	1/10	2/5	1/2
+1/2	0	3/5	1/15
-1/2	1	3/10	-8/15
		1/6	5/2
		-1/2	3/2
		-1/2	-1/2

+1/2 -1	3/10	8/15	1/6
-1/2	0	3/5	-1/15
-3/2	1	1/10	-2/5
		1/2	-3/2
		-3/2	-3/2

-1/2 -1	3/5	2/5	5/2
-3/2	0	2/5	-3/5
		-5/2	

1×1

2	2	1
+2	1	+1
+1	0	1/2
0	1	1/2
		1/2
		-1/2

+1	0	1/2	1/2
0	1	1/2	-1/2
		2	1
		0	0
		0	0

+1	-1	1/6	1/2	1/3
0	0	2/3	0	-1/3
-1	1	1/6	-1/2	1/3
		2	1	
		-1	-1	

0	-1	1/2	1/2	2
-1	0	1/2	-1/2	-2
		-1	-1	1

0	-1	1/2	1/2	2
-1	0	1/2	-1/2	-2
		-1	-1	1

$$d_{m,0}^\ell = \sqrt{\frac{4\pi}{2\ell+1}} Y_\ell^m e^{-im\phi}$$

$$\langle j_1 j_2 m_1 m_2 | j_1 j_2 J M \rangle = (-1)^{J-j_1-j_2} \langle j_2 j_1 m_2 m_1 | j_2 j_1 J M \rangle$$

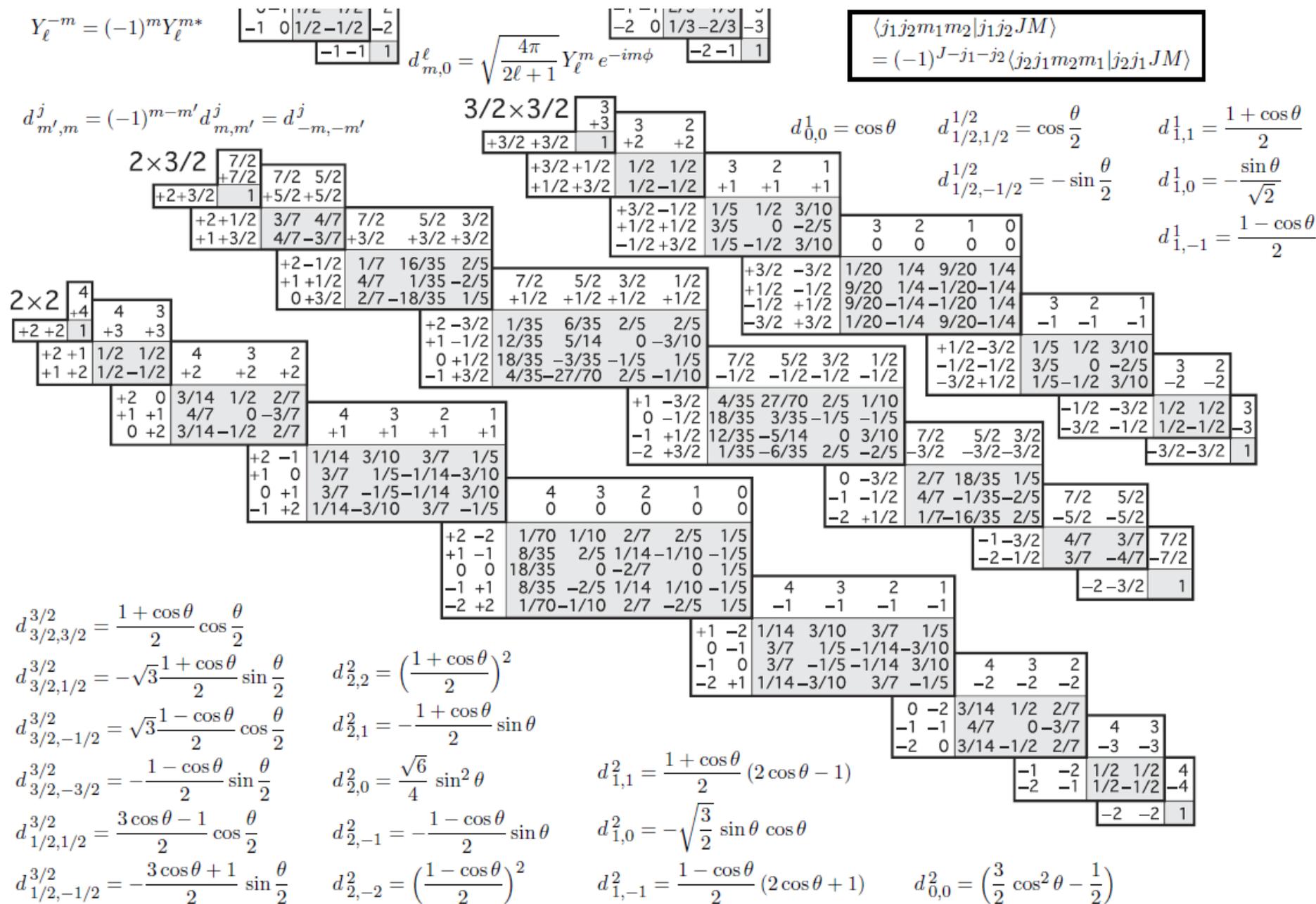


Figure 36.1: The sign convention is that of Wigner (*Group Theory*, Academic Press, New York, 1959), also used by Condon and Shortley (*The Theory of Atomic Spectra*, Cambridge Univ. Press, New York, 1953), Rose (*Elementary Theory of Angular Momentum*, Wiley, New York, 1957), and Cohen (*Tables of the Clebsch-Gordan Coefficients*, North American Rockwell Science Center, Thousand Oaks, Calif., 1974).

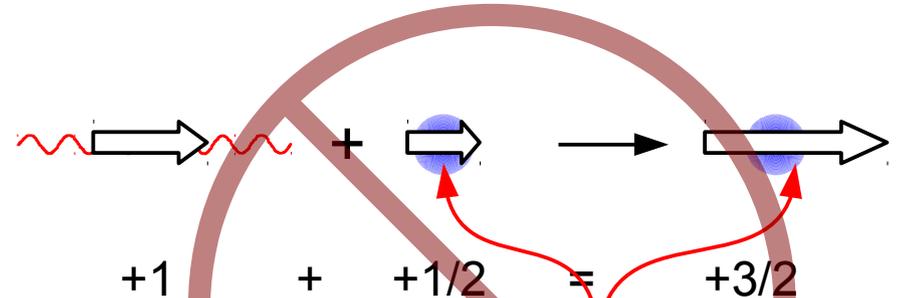
スピン1/2の荷電粒子による光子の選択的吸収



$$+1 + -1/2 = +1/2$$



$$-1 + +1/2 = -1/2$$



$$+1 + +1/2 = +3/2$$

反応の前後で
『スピンの大きさ』が変化

	スピンの大きさ	スピンの値
電子	$1/2$	$-1/2, +1/2$
陽子	$1/2$	$-1/2, +1/2$
中性子	$1/2$	$-1/2, +1/2$
光子	1	$-1, 1$

原子核のスピンの

YAMAGATA UNIVERSITY

陽子のスピン $\frac{1}{2}$
 中性子のスピン $\frac{1}{2}$
 原子核内での陽子・中性子の軌道角運動量

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{原子核のスピン} \\ \vec{J} = \vec{S} + \vec{L} = \sum_i \vec{S}_i + \sum_i \vec{L}_i \end{array} \right.$$

1	H	1	1/2+	7.289	99.985% 1
2	He	3	1/2+	14.931	0.000137% 3
		4	0+	2.425	99.999863% 3

原子核内の2核子の入れ替え $|A\rangle = \dots |N_i\rangle |N_j\rangle \dots$

整数スピン 対称 $\dots |N_i\rangle \dots |N_j\rangle \dots = + \dots |N_j\rangle \dots |N_i\rangle \dots$

半整数スピン 反対称 $\dots |N_i\rangle \dots |N_j\rangle \dots = - \dots |N_j\rangle \dots |N_i\rangle \dots$



ヘリウムのスピン

YAMAGATA UNIVERSITY

2 He	3	1/2+	14.931	0.000137% 3
	4	0+	2.425	99.999863% 3

$${}^3\text{He} \quad \text{p, p, n} \quad \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \rightarrow (0, 1) + \frac{1}{2} \rightarrow \left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}\right)$$

$${}^4\text{He} \quad \text{p, p, n, n} \quad \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \rightarrow (0, 1, 2)$$



スピンと磁気モーメントとの関係

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\mu}_s = \frac{g_s \mu_B}{\hbar} \vec{S} \\ \mu_s = g_s \mu_B S \end{array} \right. \quad \mu_B = \frac{e \hbar}{2 m_e}$$

磁気モーメントの大きさ

電子の場合

$$g_s = -2$$

$$s = -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \mu_s = -\mu_B \quad (s = +\frac{1}{2}) \\ \mu_s = +\mu_B \quad (s = -\frac{1}{2}) \end{array} \right.$$

※ 『スピン』の向きと、『磁気モーメント』の向きが逆



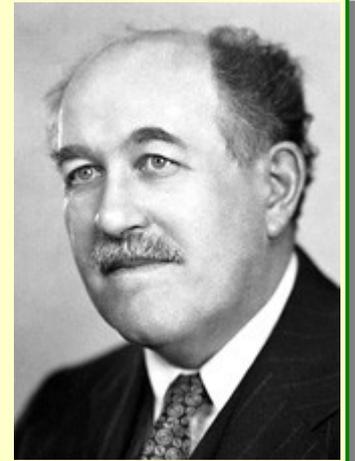
$$\vec{\mu} = g \frac{Q}{2m\hbar} \vec{S}$$



磁気モーメント測定から
スピンを決定

1943年 オットー・シュテルン

原子線法の開発と
陽子の磁気モーメントの発見



- ・ 電子磁気モーメントの量子化の発見
- ・ 陽子の磁気モーメントの測定に成功

1944年 イジドール・イザーク・ラビ

共鳴法による
原子核の磁気モーメントの
測定法の発見



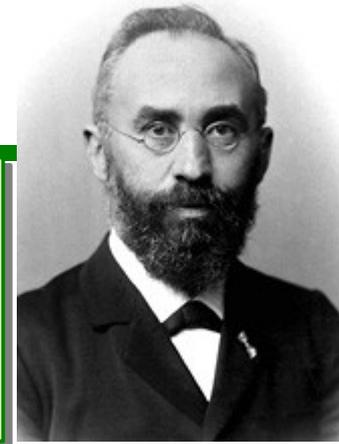
- ・ 原子線磁気共鳴法の確立



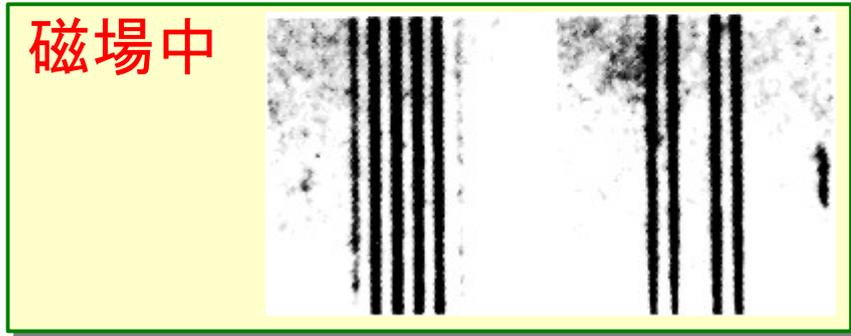
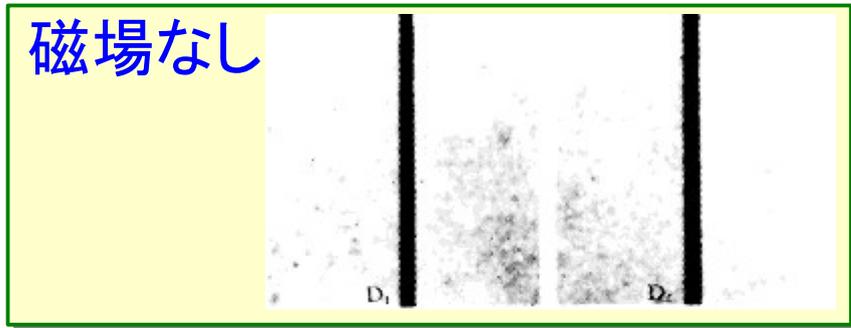
磁気モーメントと原子構造

YAMAGATA UNIVERSITY

1902年 ヘンドリック・ローレンツ、
ピーター・ゼーマン 
 放射に対する磁場の影響の研究



1896年 ナトリウム原子を磁場の中で発光させた時、
 そのD線スペクトルが複数に分かれる事を発見

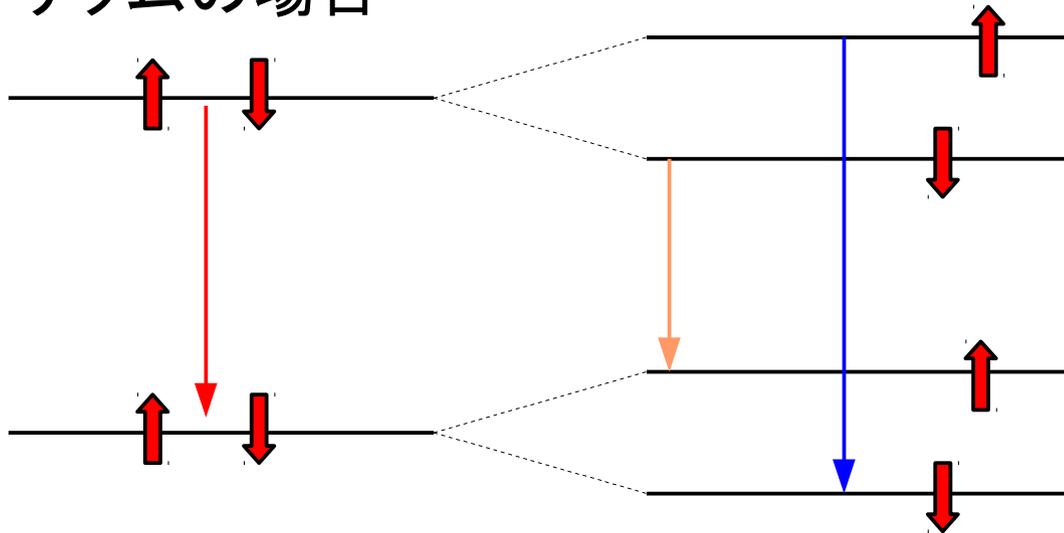


⇒ 『ゼーマン効果』の発見

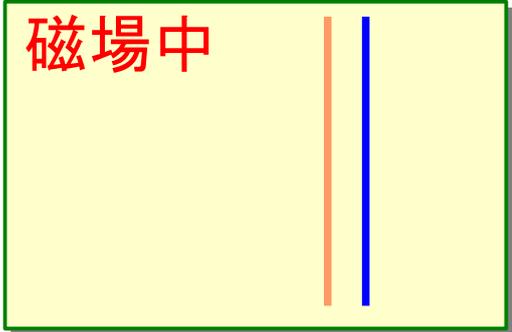
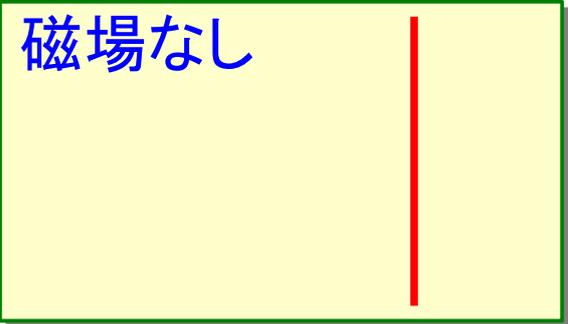
⇒ 光を放射している粒子(電子)の比電荷を測定 1/1600 (現在の値 1/1836)

磁場に対する磁気モーメントの向きで、
 エネルギー準位のエネルギーに差が生まれる
 磁気モーメントの向き → スピンの向き

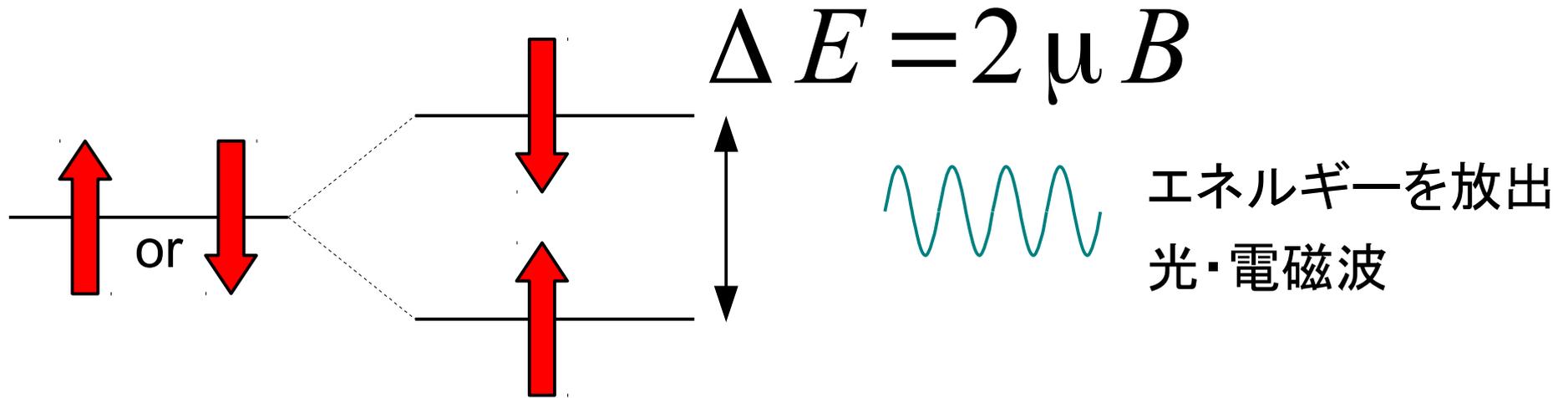
ナトリウムの場合



磁場による
 エネルギー準位の分離
 (ゼーマン効果)により、
 スペクトルが分裂する。

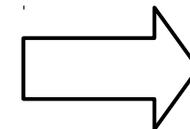


磁気モーメントを持つ粒子を磁場中におくと、ゼーマン効果が生じエネルギー準位は分離



エネルギー差に相当するエネルギーを外部から供給

- 下の準位にある電子は上の準位に遷移
- 磁気モーメントの向き(スピンの向き)が反転する

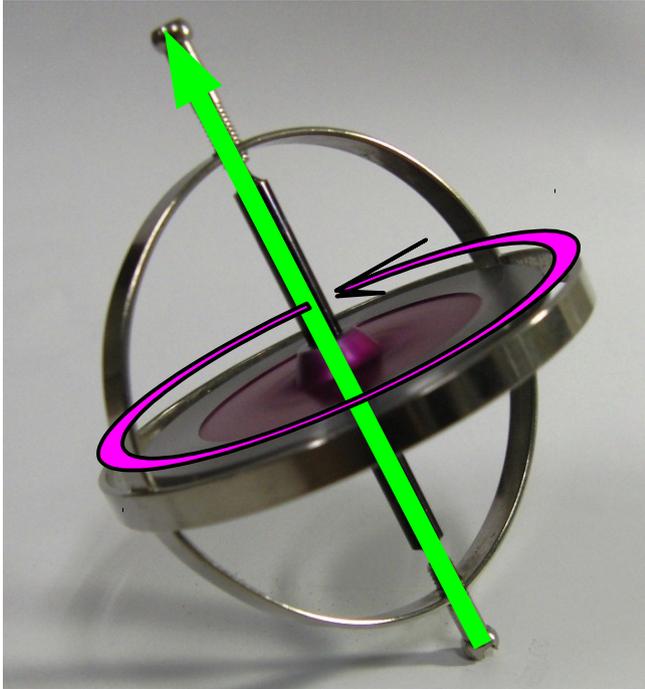


磁気共鳴



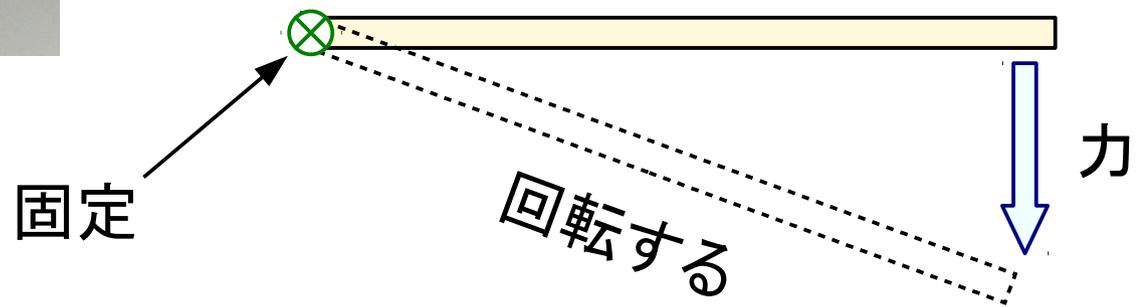
角運動量

YAMAGATA UNIVERSITY



物体が回転する時
『右ネジ』方向に『角運動量』

端を固定した物体に力を作用させる



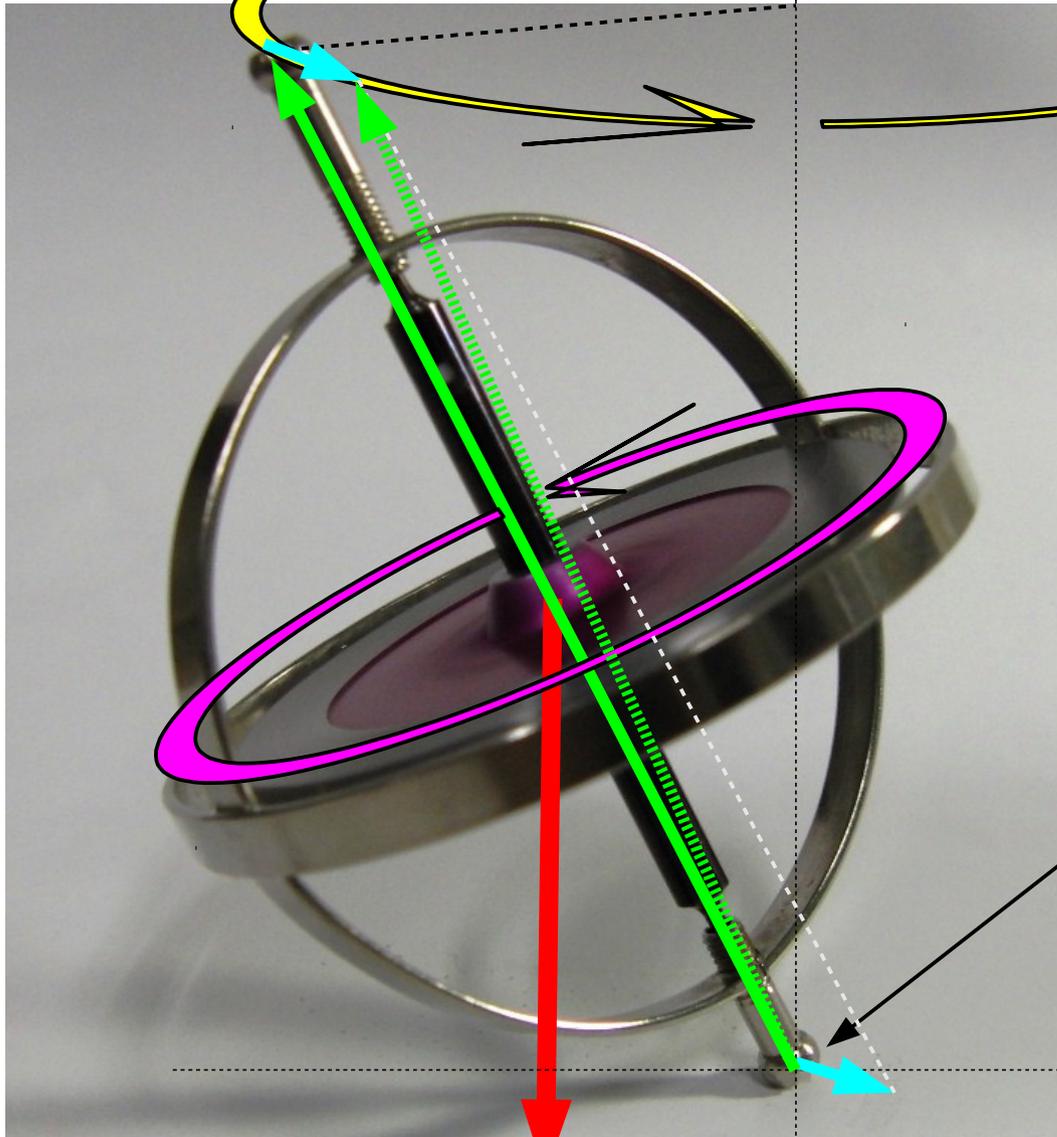
『角運動量』が生まれる

回転している物体に力を作用させると...

$$\dot{\vec{L}} = \vec{N} = \vec{r} \times \vec{F}$$

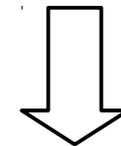


コマが歳差運動する理由



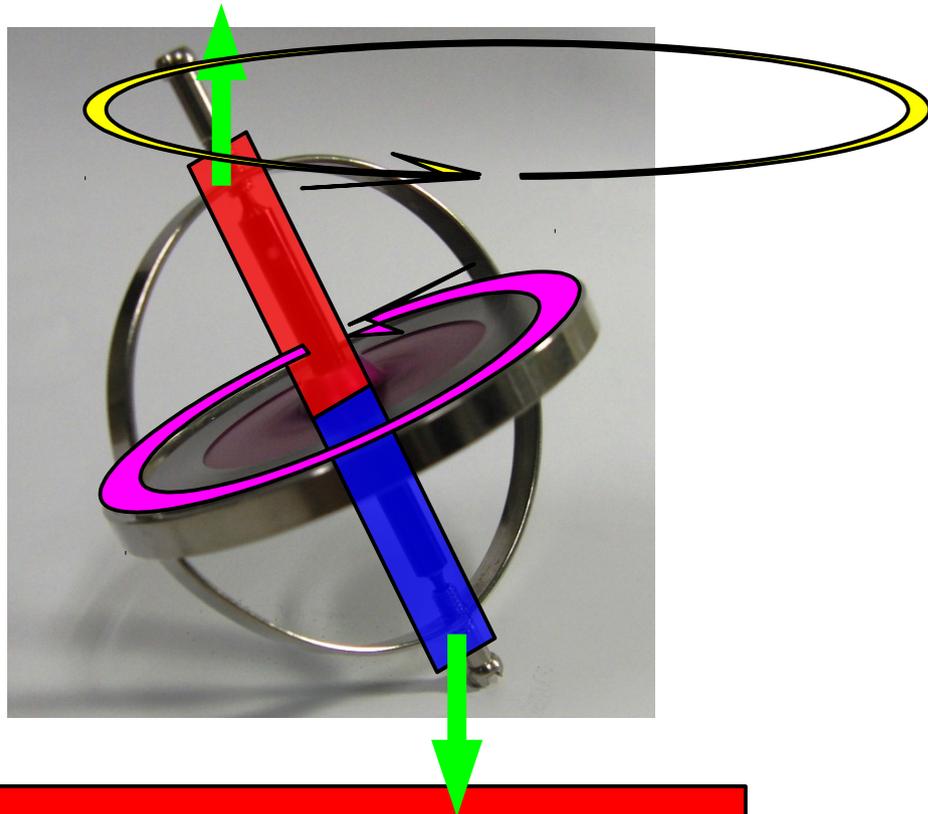
回転しているコマに
重力が作用すると
新たな角運動量が生まれ
コマの軸が少しずれる

固定点



コマの歳差運動

重力

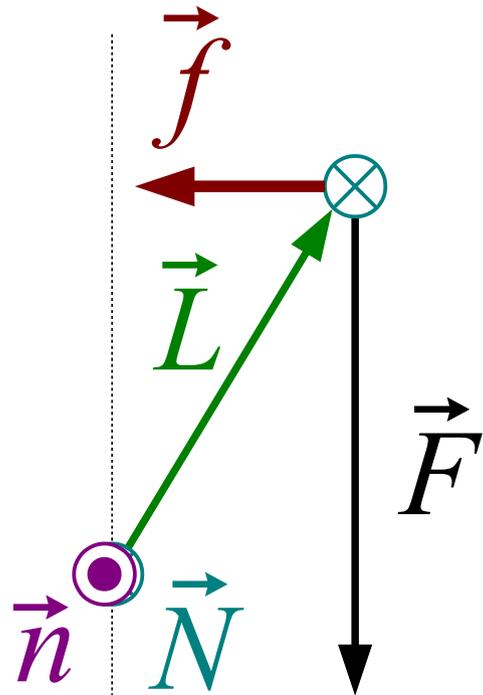


コマ → 回転電流
軸方向に磁気モーメント
磁石の中においてみる
磁場の力を受ける
磁気モーメントの歳差運動

ラーモア歳差運動



他に外力が働くと



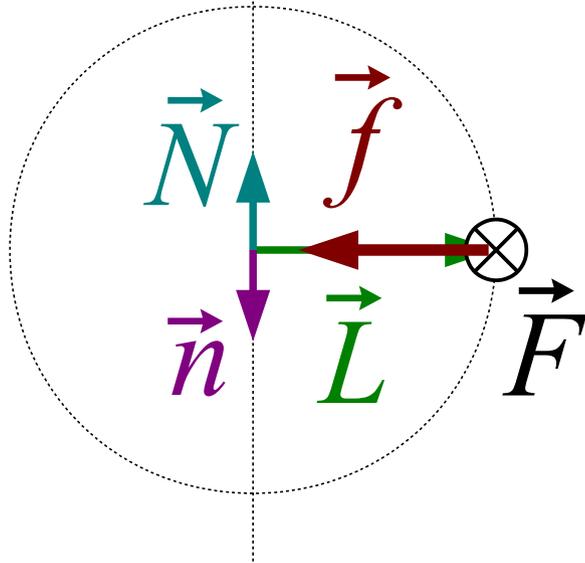
適当な力 f を (回転軸に向けて) 横向きに作用

モーメント n が生まれる

軌道角運動量の変化

$$\Delta \vec{L} = (\vec{N} - \vec{n}) \Delta t$$

$\Delta \vec{L} = 0$ となる 外力 f が存在する



歳差運動の合わせて、

適当な大きさの向心力を作用

→ 歳差運動が停止

→ 見かけ上外力 F が消える



ラーモア歳差運動をしている回転体に
横向きに回転磁場を与える

- ラーモア周波数の回転磁場 μB : 向心力
- 外部磁場を打ち消す

- ・ 回転磁場の周波数をラーモア周波数前後で掃引
 - 歳差運動の軸が次第に傾き
 - ラーモア周波数で軸が反転
 - 歳差運動の向きが逆転

横向きの磁場 = 外部から与えるエネルギー
→ 外部からエネルギーを与える事で、
磁気モーメントの向きを反転



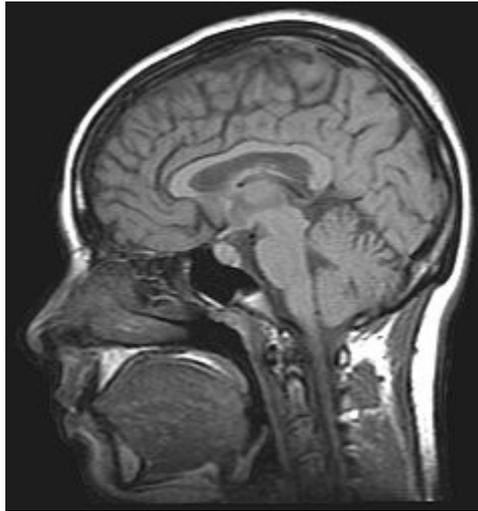
磁気共鳴の応用

YAMAGATA UNIVERSITY

核磁気共鳴画像法 (MRI: **M**agnetic **R**esonance **I**maging)

水素原子の原子核(陽子)の磁気共鳴を利用し、

体内の主に水(H₂O)の分布を精密に測定 → 断層画像を得る



http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3b/MRI_brain.jpg



http://pothi.blog.so-net.ne.jp/_images/blog/_le8/pothi/m_me_mri_1.jpg

2003年 ノーベル生理学・医学賞

ポール・ラウターバー、ピーター・マンズフィールド

核磁気共鳴画像法に関する発見



原子線磁気共鳴法

YAMAGATA UNIVERSITY

電子にくらべ、
原子核の磁気モーメントは
非常に小さい

1944年 イジドール・イザーク・ラビ
共鳴法による
原子核の磁気モーメントの
測定法の発見

