

## 原子核物理とがん治療

- 原子核物理学について
  - 原子核とは何？
  - 原子核の様々な性質
- 社会における原子核
  - 工業・農業への応用
  - 医療(がん治療)への応用

東北大学大学院理学研究科  
物理学専攻  
原子核理論研究室  
准教授 萩野浩一

# Powers of Ten (10のべき乗)

$$1 \text{ m} \times 1 \text{ m} = 10^0 \text{ m} \times 10^0 \text{ m}$$

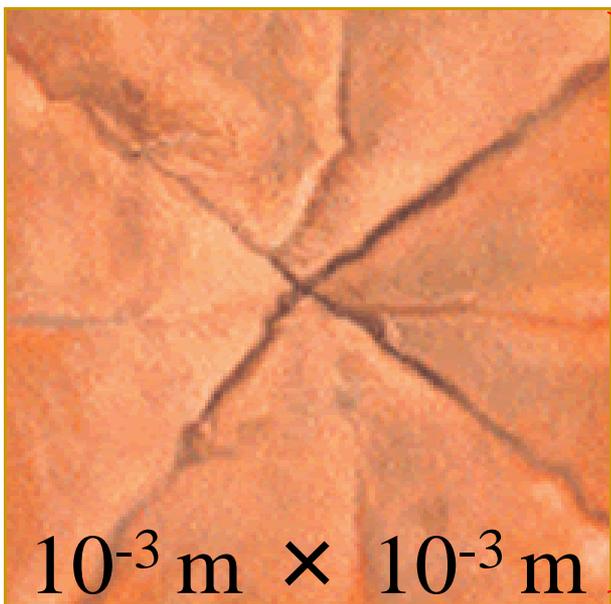
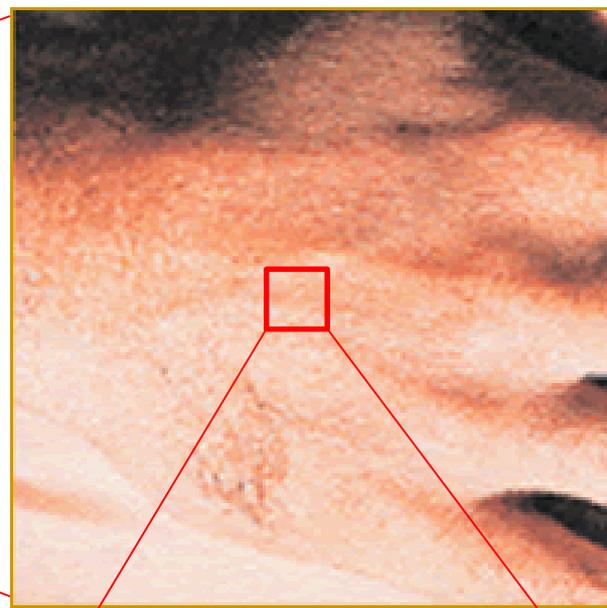


- 1977年にアメリカで作られた教育映画
- 公園で昼寝している人がスタート
- そこから段々スケールが大きくなり宇宙空間へ
- 次にスケールが小さくなり原子・原子核の世界へ

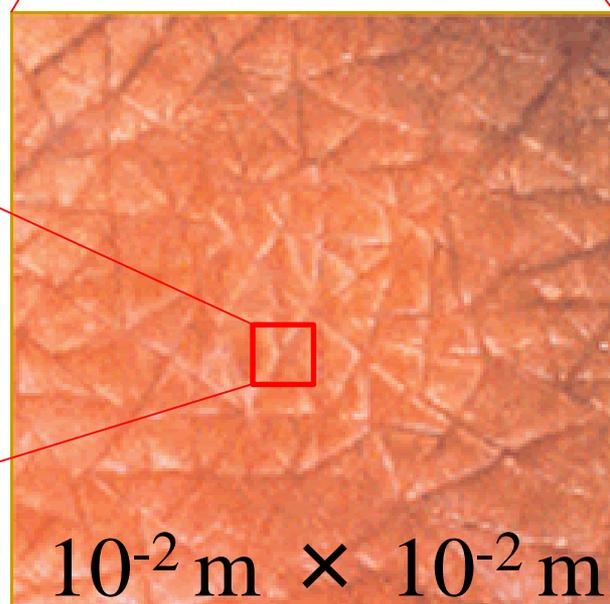
$10^0 \text{ m} \times 10^0 \text{ m}$



$10^{-1} \text{ m} \times 10^{-1} \text{ m}$



$10^{-3} \text{ m} \times 10^{-3} \text{ m}$



$10^{-2} \text{ m} \times 10^{-2} \text{ m}$

このまま続けると。。。。

$10^{-6} \text{ m} \times 10^{-6} \text{ m}$



細胞

$10^{-7} \text{ m} \times 10^{-7} \text{ m}$



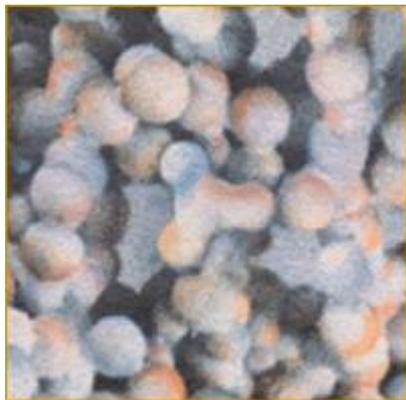
絡み合うDNA

$10^{-8} \text{ m} \times 10^{-8} \text{ m}$



DNAの2重らせん構造

$10^{-9} \text{ m} \times 10^{-9} \text{ m}$



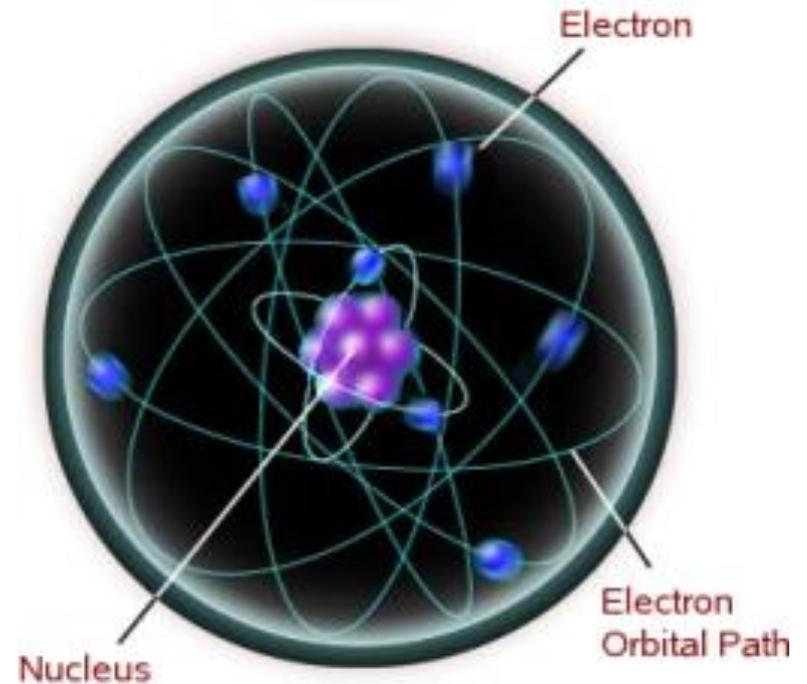
DNAは高分子  
生体物質

# 分子は原子の集合体

$$10^{-10} \text{ m} \times 10^{-10} \text{ m}$$

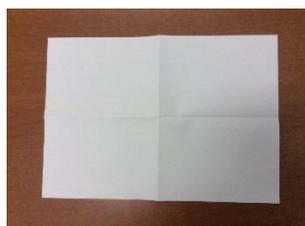


原子における電子の雲

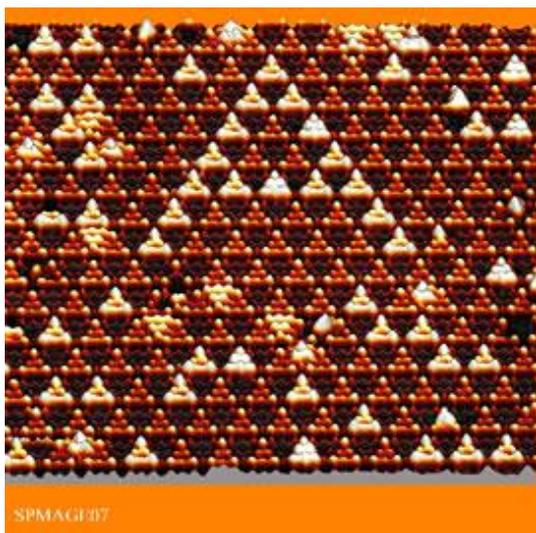


原子の構造

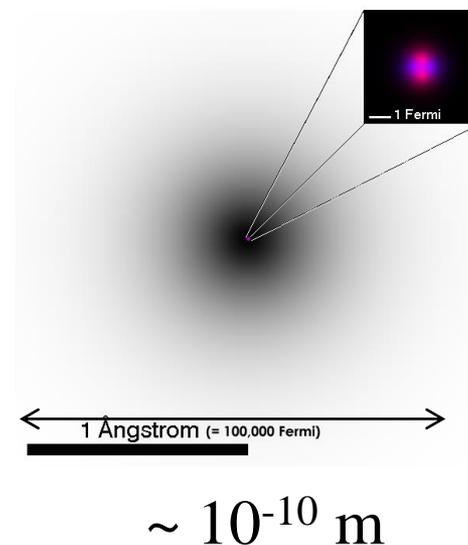
# すべてのものは原子から組み立てられる



- タレス、デモクリトス(古代ギリシャ)
- ドルトン(19世紀初頭の化学者)
- ボルツマン(19世紀後期)
- アインシュタイン(1905年)



走査トンネル顕微鏡  
の写真  
(東北大学物理学専攻  
表面物理研究室)



# すべてのものは原子から組み立てられる

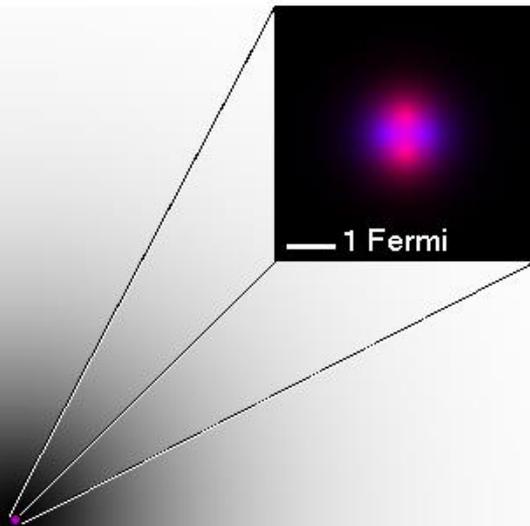
たった一つの文章しか次世代の人間に継承されないとしたら、どんな文章を残せば最小限の言葉で最大限の情報を伝えられるだろうか。その文章とは、「万物は原子から構成されている」である。

(リチャード・ファインマン)



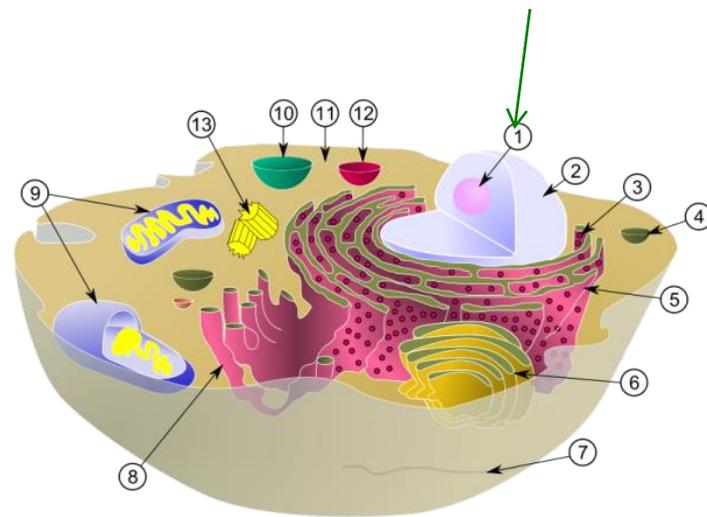
リチャード・ファインマン  
(1918-1988)  
1965年ノーベル物理学賞  
受賞  
(写真: The Nobel Foundation)

# 原子の中身



## 原子の核(原子核)

### 細胞核



## 原子の中身

## (参考)細胞の中身

$10^{-11} \text{ m} \times 10^{-11} \text{ m}$



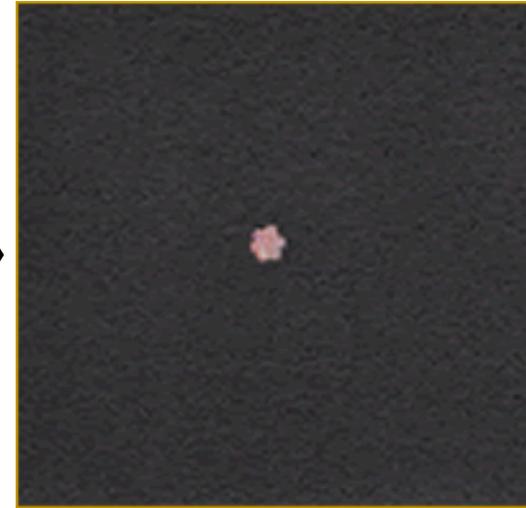
最も内側をまわる  
電子の雲

$10^{-12} \text{ m} \times 10^{-12} \text{ m}$



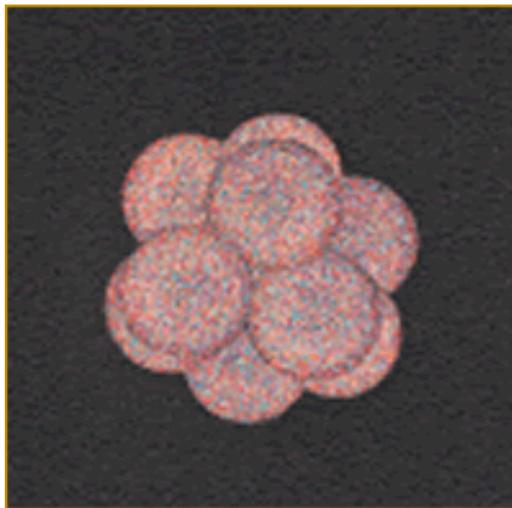
かすかに原子核が  
見え始めた

$10^{-13} \text{ m} \times 10^{-13} \text{ m}$



だんだんはつきりと  
見えてきた

$10^{-14} \text{ m} \times 10^{-14} \text{ m}$



ようやく原子核の構造が  
見えた

# 原子の中身

## 原子核

陽子 (プラスの電気)

中性子 (電気なし)

10万倍  
に拡大

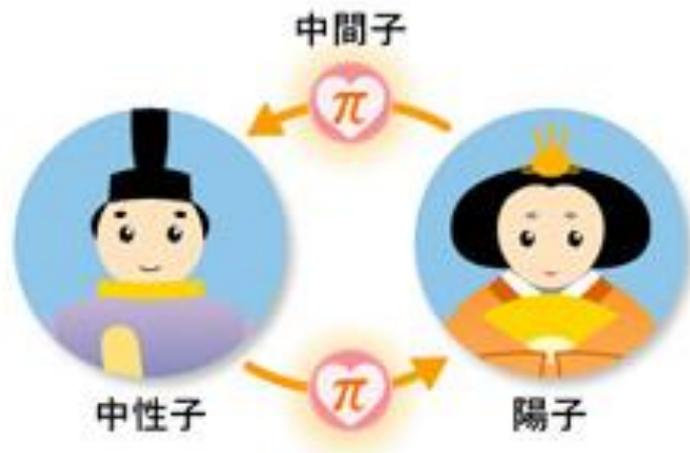
電子の雲  
(マイナスの電気)



0.000000000001 m

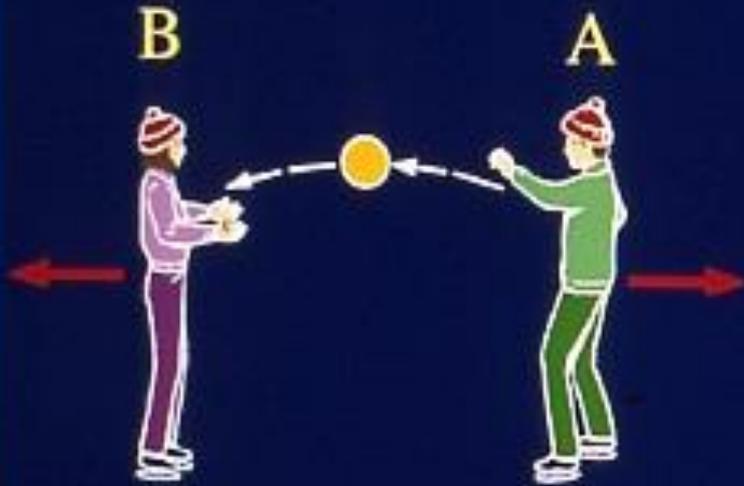
- 陽子の数 = 電子の数
- 化学的な性質 = 電子の数

どうして正の電荷を狭い空間に閉じ込めておくことができるのか？

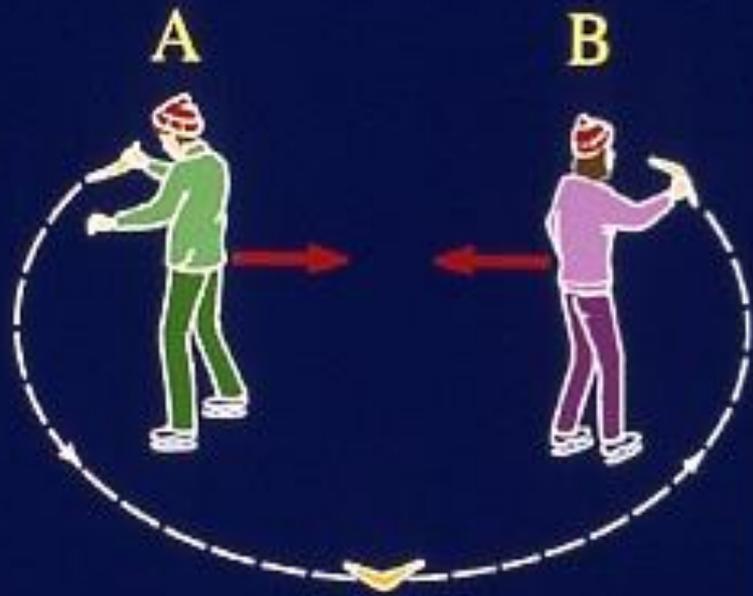


## 湯川秀樹の中間子理論

核子(陽子、中性子)は中間子を交換することで  
引きつけ合う(強い力)



(a)



(b)

# 元素の周期表

Group → ↓ Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	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	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
Lanthanides				57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
Actinides				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 Md	102 No	103 Lr

化学的な性質(=電子の数=陽子の数)によって  
原子を並べたもの = 元素

# 人の体はどんな元素から出来ている？

酸素 43 kg  
炭素 16 kg  
水素 7 kg  
窒素 1.8 kg  
カルシウム 1.0 kg  
リン 780 g  
カリウム 140 g  
硫黄 140 g  
ナトリウム 100 g  
塩素 95 g  
マグネシウム 19 g  
鉄 4.2 g  
フッ素 2.6 g  
亜鉛 2.3 g  
ケイ素 1.0 g  
ルビジウム 0.68 g  
ストロンチウム 0.32 g  
臭素 0.26 g  
鉛 0.12 g  
銅 72 mg  
アルミニウム 60 mg  
カドミウム 50 mg

セリウム 40 mg  
バリウム 22 mg  
ヨウ素 20 mg  
スズ 20 mg  
チタン 20 mg  
ホウ素 18 mg  
ニッケル 15 mg  
セレン 15 mg  
クロム 14 mg  
マンガン 12 mg  
ヒ素 7 mg  
リチウム 7 mg  
セシウム 6 mg  
水銀 6 mg  
ゲルマニウム 5 mg  
モリブデン 5 mg  
コバルト 3 mg  
アンチモン 2 mg  
銀 2 mg  
ニオブ 1.5 mg  
ジルコニウム 1 mg  
ランタン 0.8 mg

ガリウム 0.7 mg  
テルル 0.7 mg  
イットリウム 0.6 mg  
ビスマス 0.5 mg  
タリウム 0.5 mg  
インジウム 0.4 mg  
金 0.2 mg  
スカンジウム 0.2 mg  
タンタル 0.2 mg  
バナジウム 0.11 mg  
トリウム 0.1 mg  
ウラン 0.1 mg  
サマリウム 50 µg  
ベリリウム 36 µg  
タングステン 20 µg



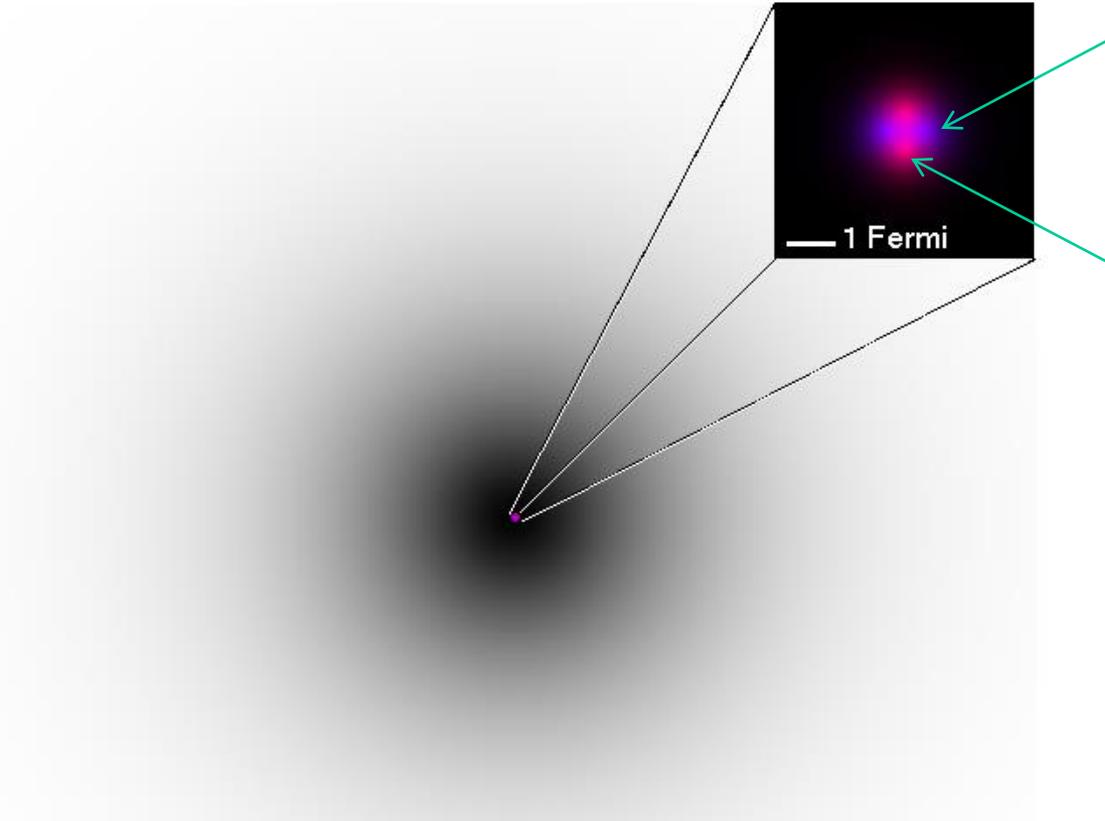
John Emsley,  
“The Elements”,  
3rd ed. Clarendon Press,  
Oxford, 1998

# 原子の中身

## 原子核

陽子 (プラスの電気)

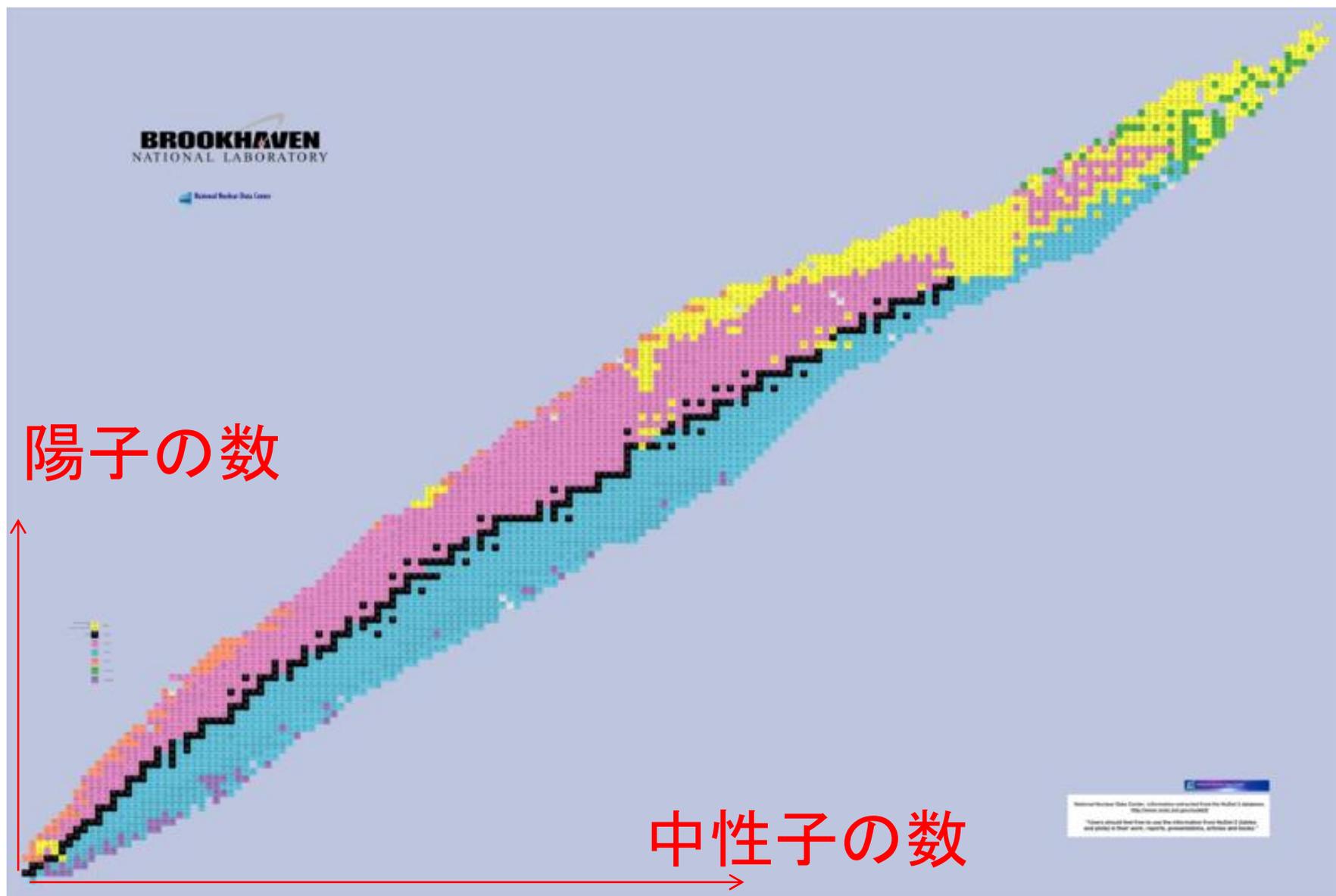
中性子 (電気なし)



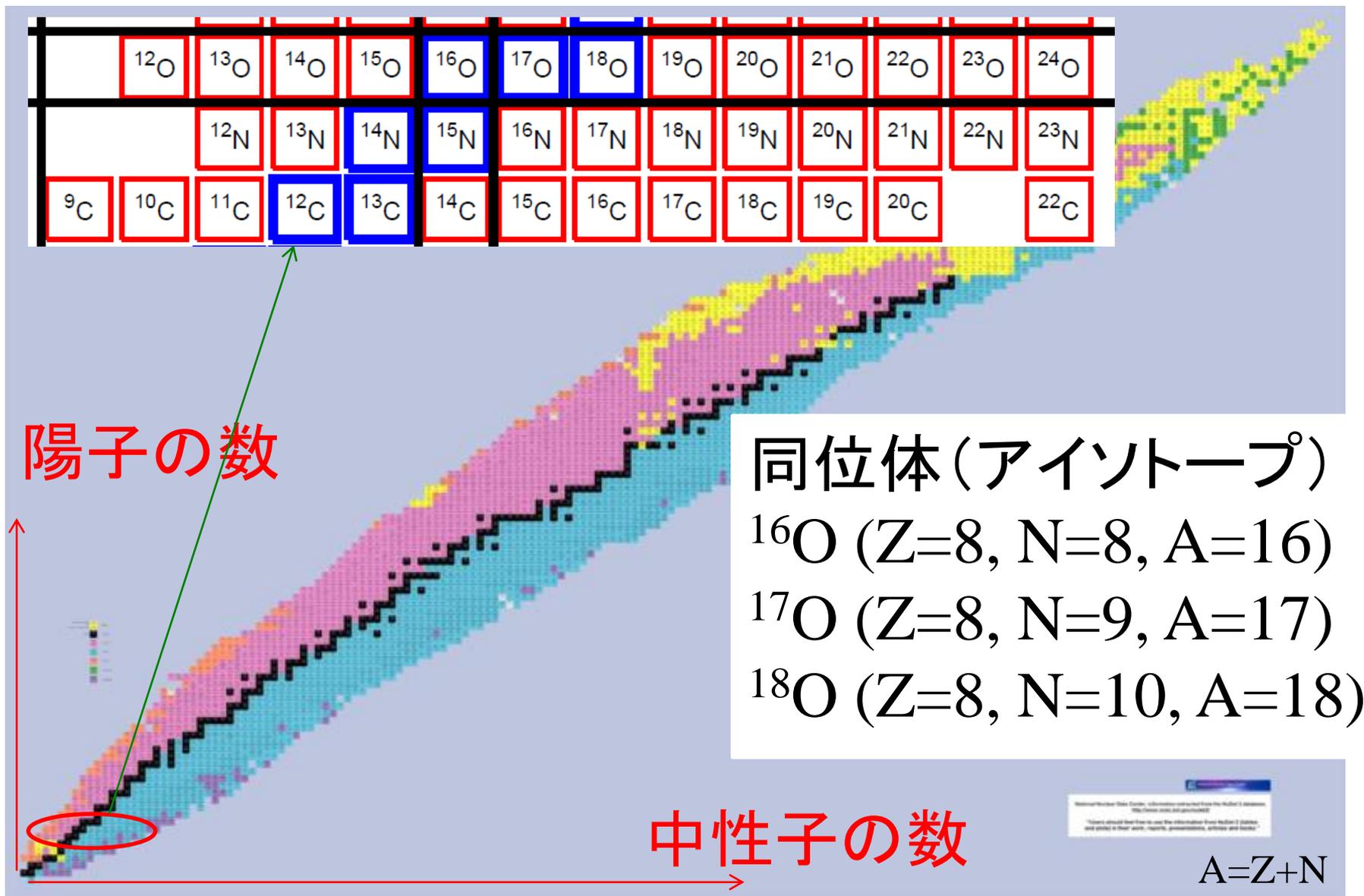
Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo

← 中性子は?

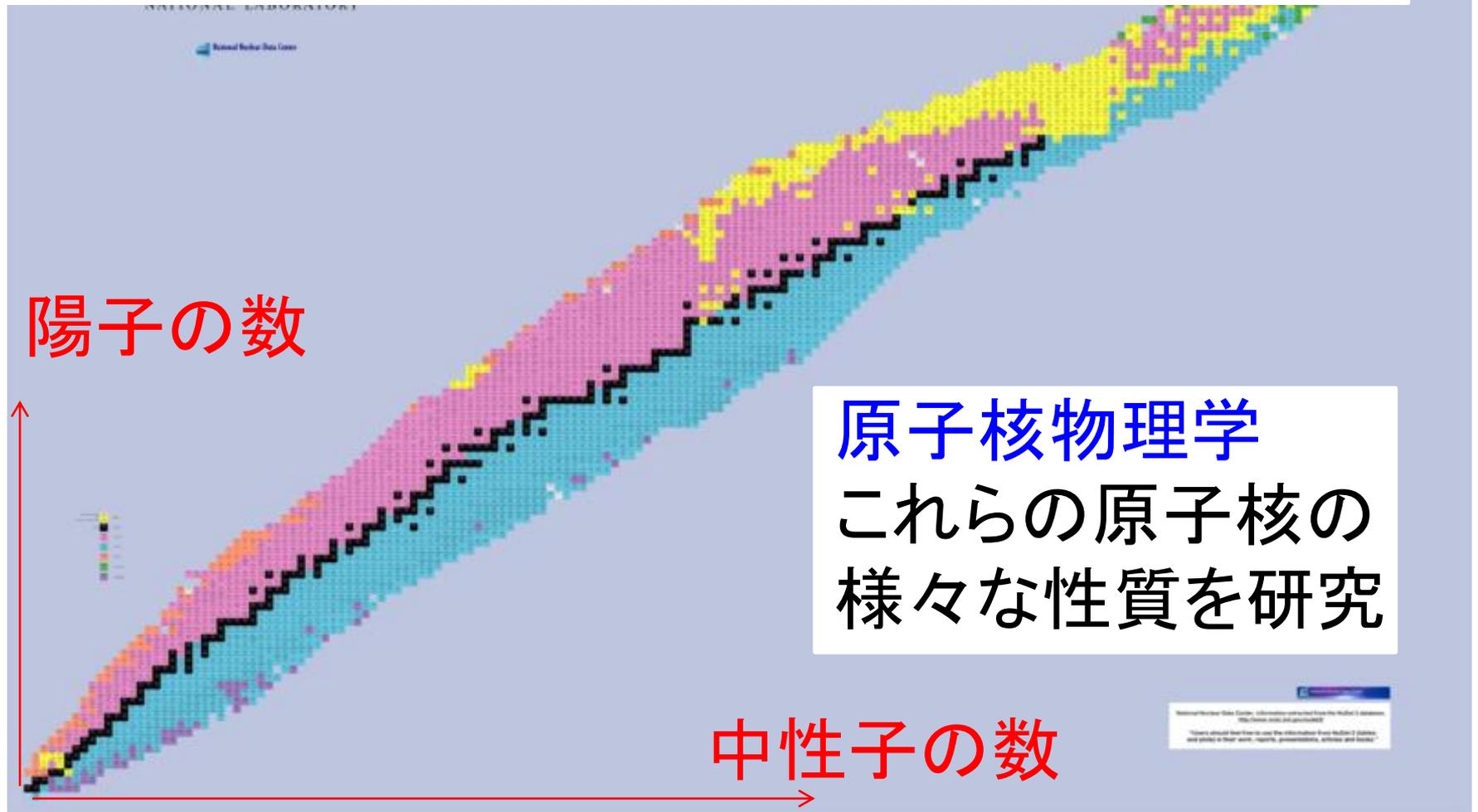
# 核図表：原子核の地図



# 核図表：原子核の地図

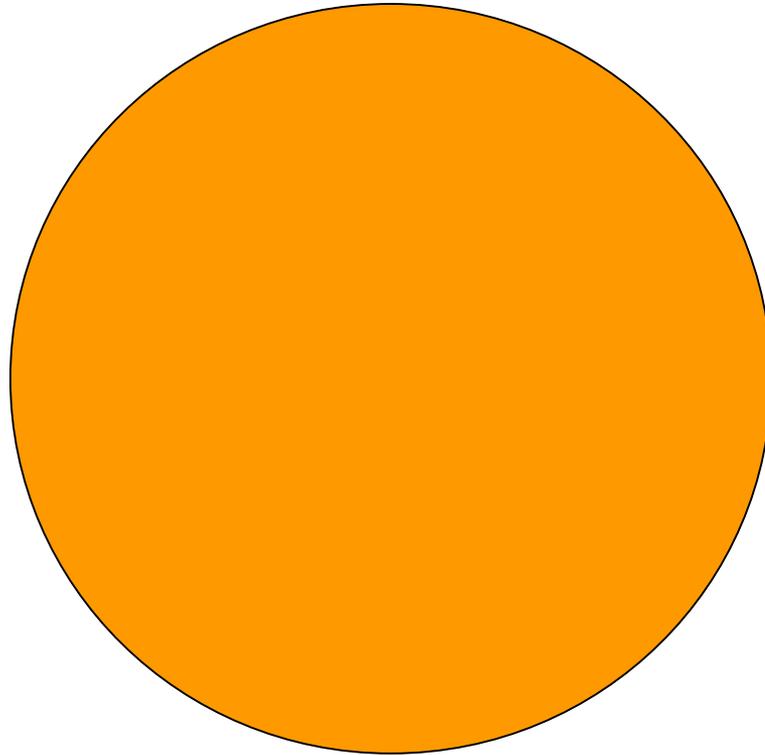


- ・自然界にある安定な原子核：287種
- ・これまで人工的に作られた原子核：約3,000種
- ・理論上存在が予想される原子核：約10,000種



# 原子核物理学で研究していることの例

➤ 原子核はどのような形をしているの？

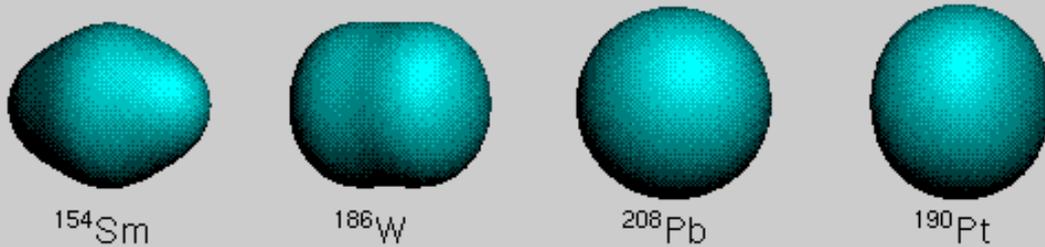


原子核はまん丸？

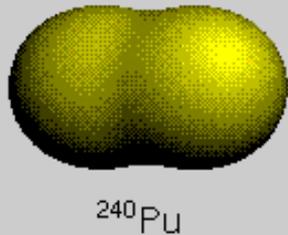
# 原子核物理学で研究していることの例

## ➤原子核はどのような形をしているの？

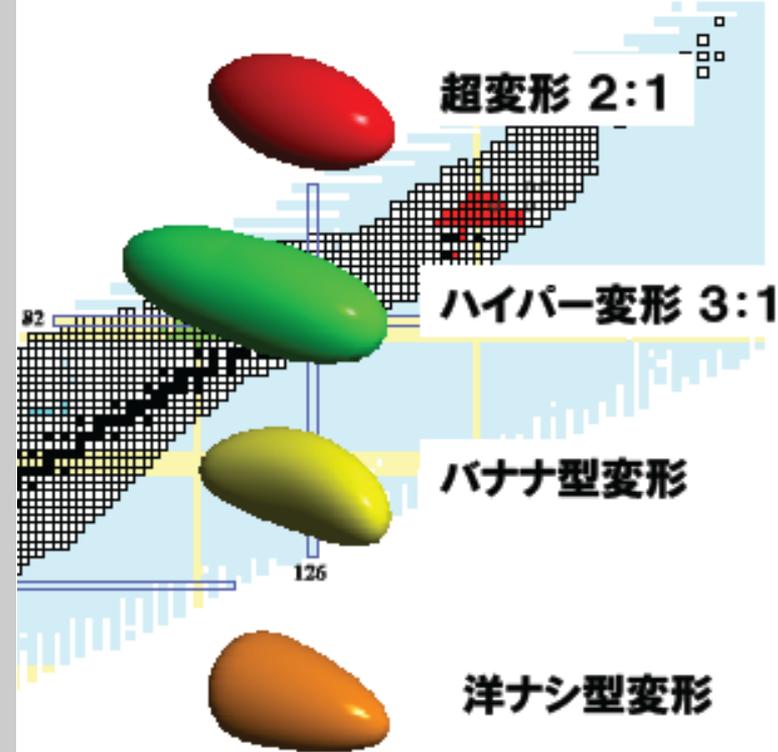
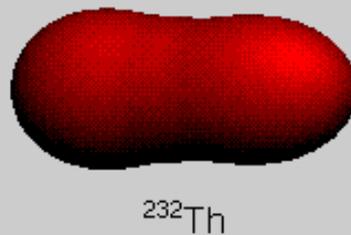
Nuclear ground-state shapes



Isomeric shape



Mass-asymmetric saddle-point shape



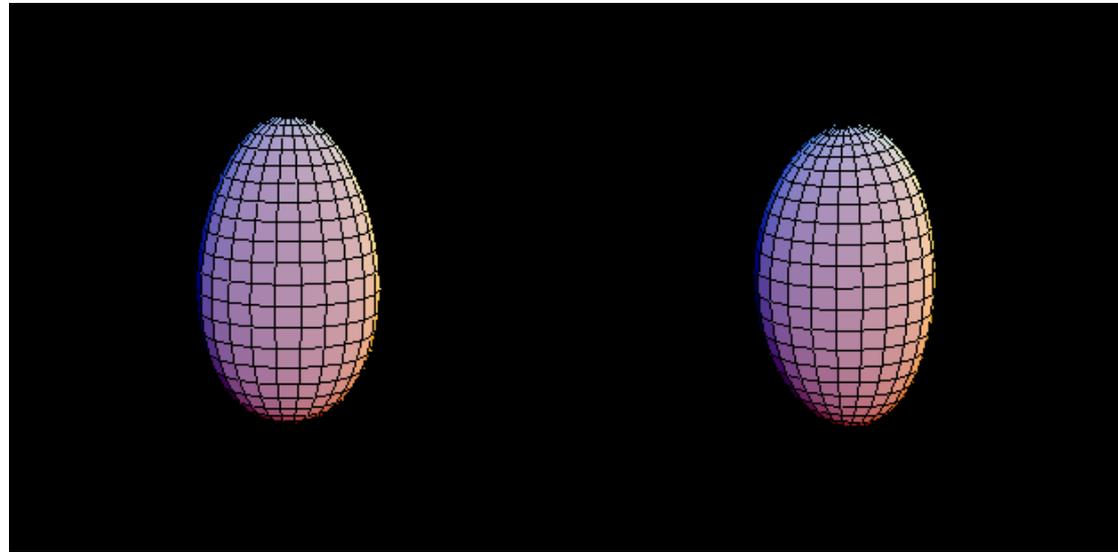
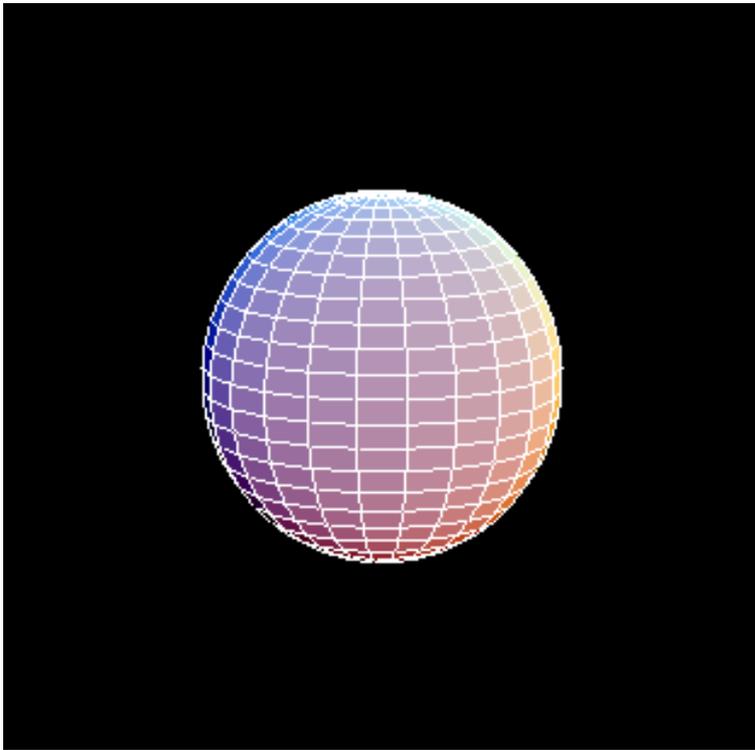
<http://t2.lanl.gov/tour/sch001.html>

原子核は陽子と中性子の組み合わせの仕方によって様々な形をとり得る！

# 原子核物理学で研究していることの例

➤ 温度(励起エネルギー)をあげるとどうなるの？

原子核を光で叩いたりすると。。。。



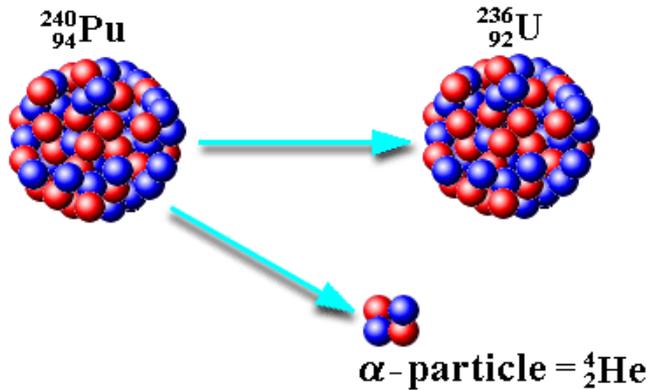
原子核が運動(振動)をはじめると

# 原子核物理学で研究していることの例

## ➤ 原子核はどのように壊れるの？

原子核は壊れるものの方がずっと多い(種類の数)

### ● $\alpha$ 崩壊(陽子が多い原子核)



### ● $\beta$ 崩壊(中性子や陽子が多い原子核)

### ● この他にも核分裂も。

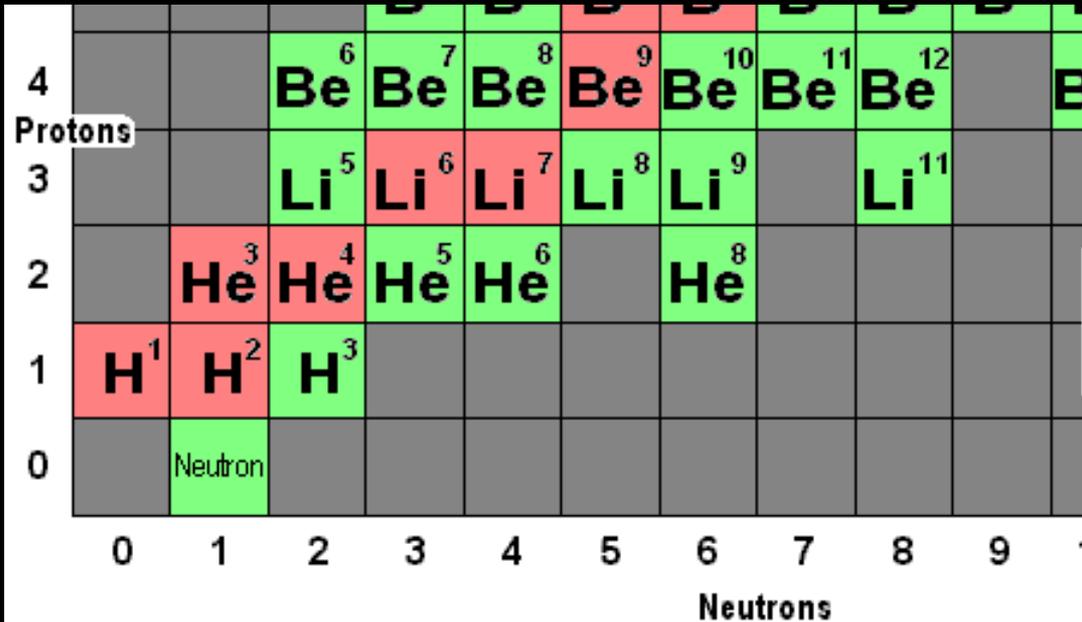
また、 $\beta$ 崩壊の後に核分裂や $\gamma$ 崩壊が起こることもある。

宇宙は「無」からビッグ・バンによって誕生した。

何も無かったところからどのようにして様々な元素ができたのか？

→ 元素の合成の謎

金やウランの起源(どうやってできたのか)は実はあまりよくわかっていない。



宇宙における原子核反応が宇宙の歴史を決めている！！

# 量子力学(りょうしりきがく)

物質は波の性質と粒子の性質の両方を持っている

電子: 粒子  
ド・ブロイ波

電磁波: 波  
光子

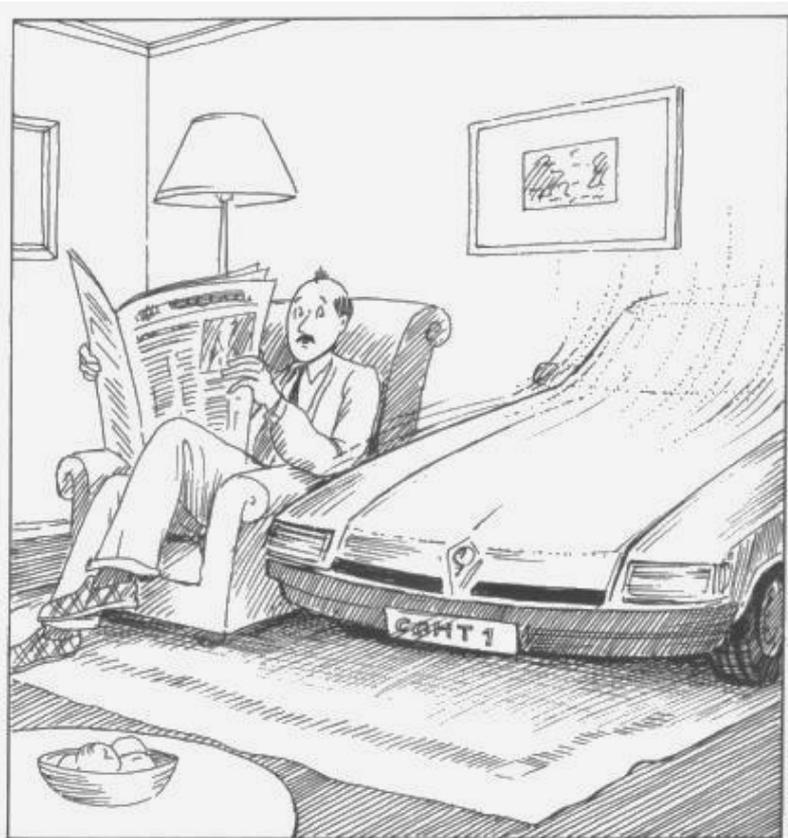
# ハイゼンベルクの不確定性原理

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq 10^{-34} \quad \text{J s}$$

位置と運動量を同時に決めることは  
できない

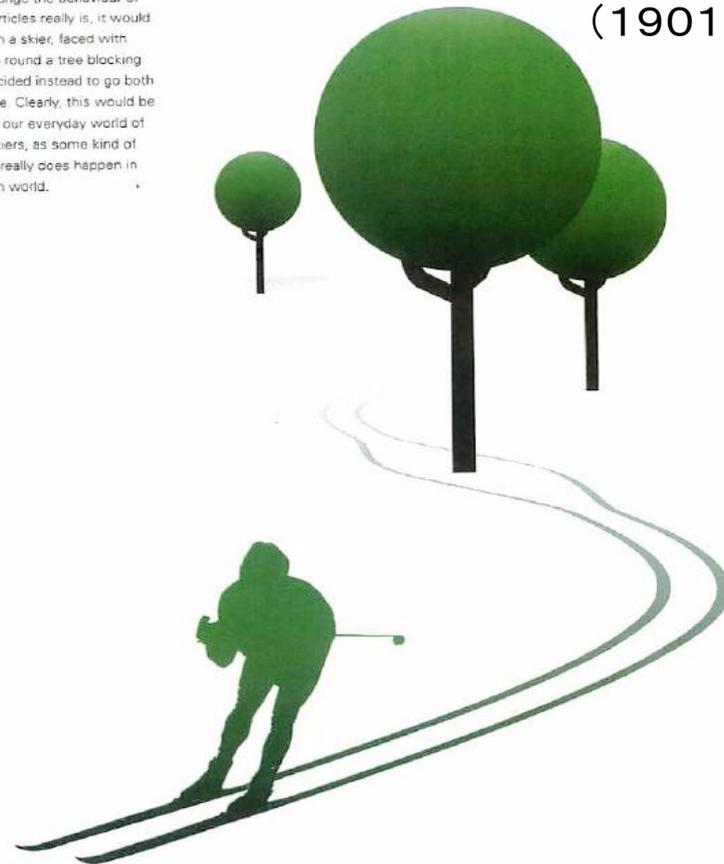


ハイゼンベルク  
(1901~1976)



What if his car leaked out of its locked garage?

just how strange the behaviour of quantum particles really is, it would be as though a skier, faced with having to go round a tree blocking his path, decided instead to go both ways at once. Clearly, this would be regarded, in our everyday world of trees and skiers, as some kind of hoax. But it really does happen in the quantum world.



# ハイゼンベルクの不確定性原理

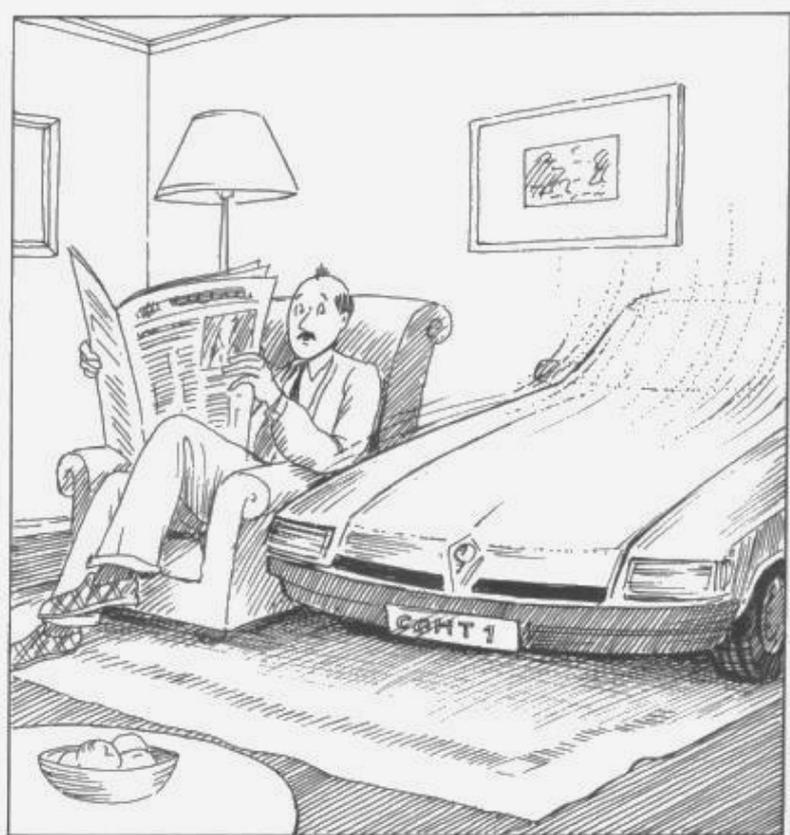
$$\Delta p \cdot \Delta x \geq 10^{-34} \quad \text{J s}$$

位置と運動量を同時に決めることはできない

....もし  $\Delta p \cdot \Delta x \geq 10 \quad \text{J s}$  だったら.....



ハイゼンベルク  
(1901~1976)



What if his car leaked out of its locked garage?

車が壁をすり抜ける!?



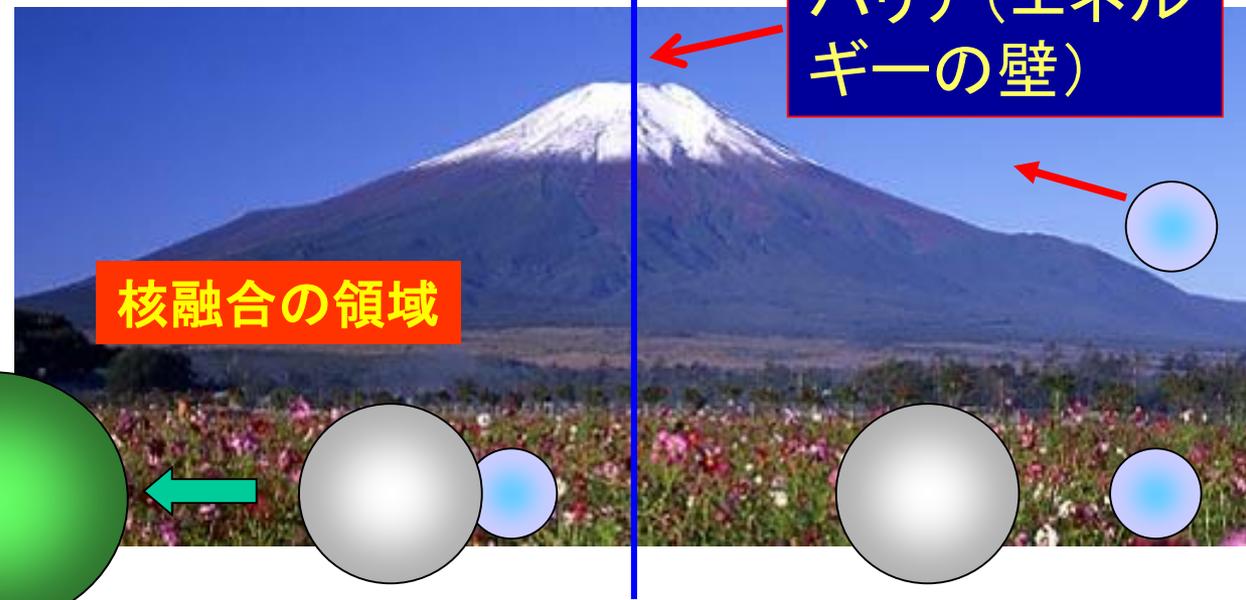
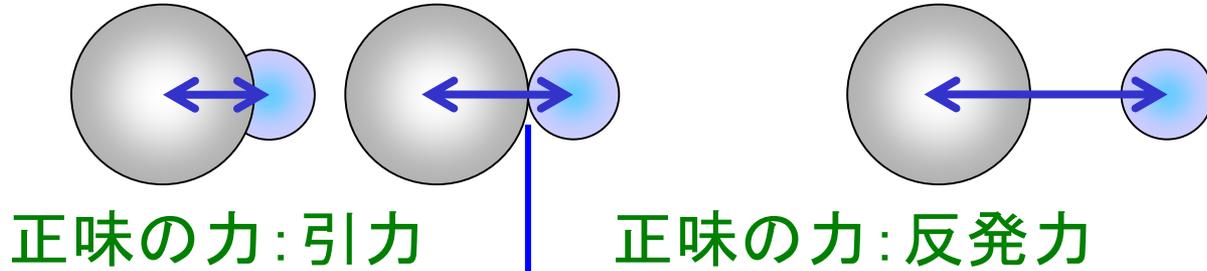
実際には電子や原子核のように質量が軽い場合のみトンネル現象が起きる

電子の質量: 約  $10^{-27}$  g

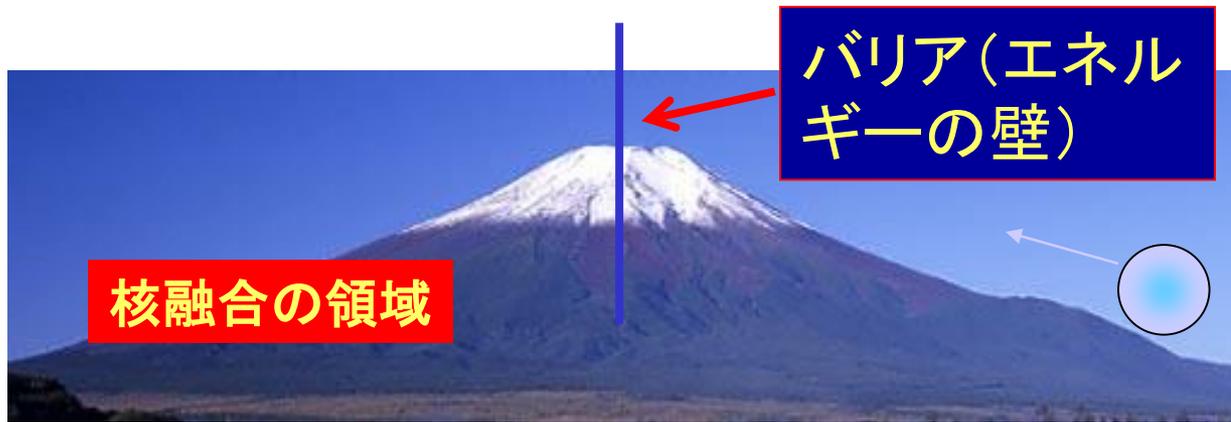
陽子の質量: 約  $10^{-24}$  g

# 星の中での核融合反応

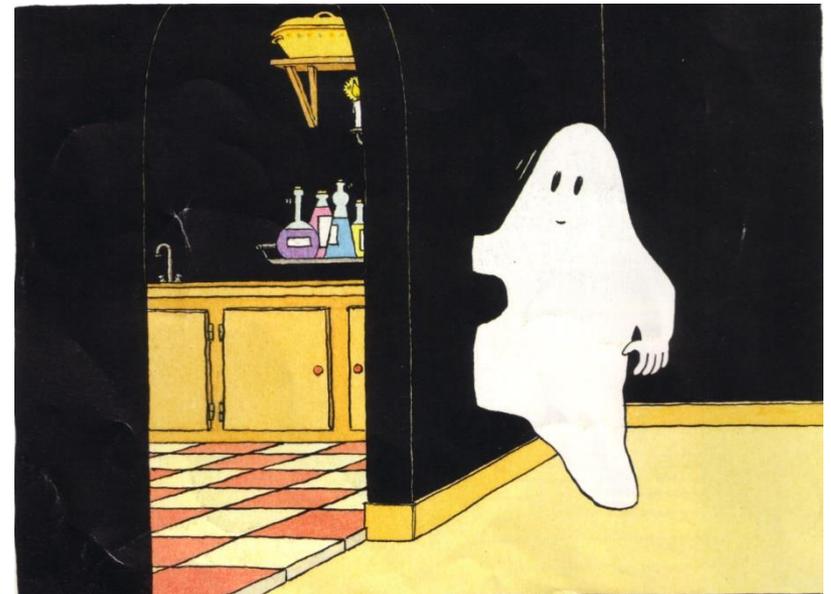
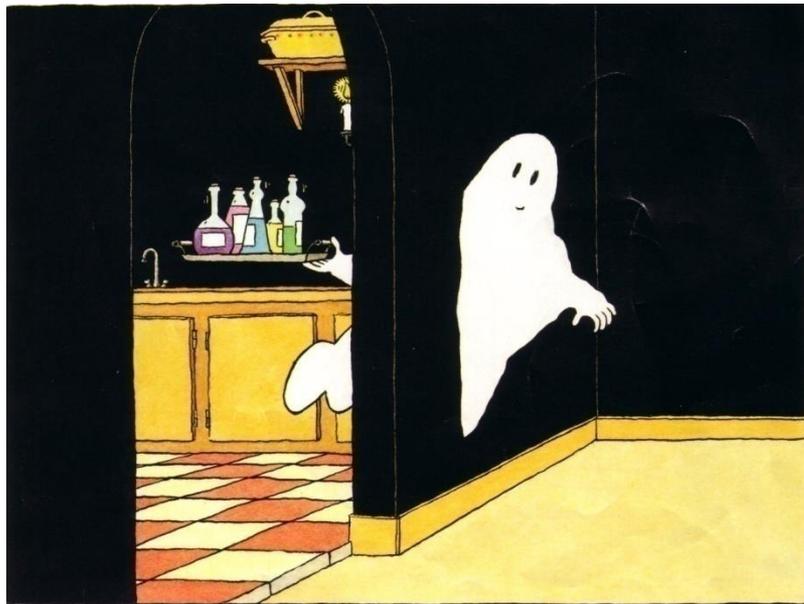
強い力(引力) vs 電磁力(反発力)



原子核を勢いよくぶつけるとバリアを乗り越えて核融合が起きる



原子核を勢いよくぶつけるとバリアを乗り越えて核融合が起きる  
....しかし、星(太陽)の中では「勢い」(エネルギー)が足りない  
→ 「量子トンネル現象」で星は輝いている



ジャック・デュケノワ著「おばけパーティー」より

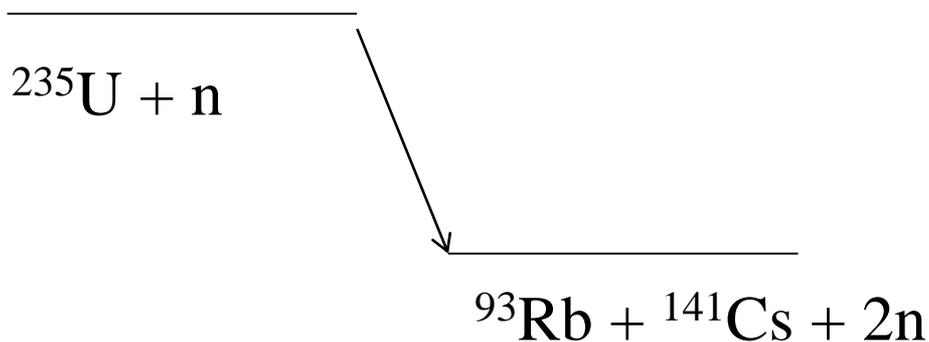
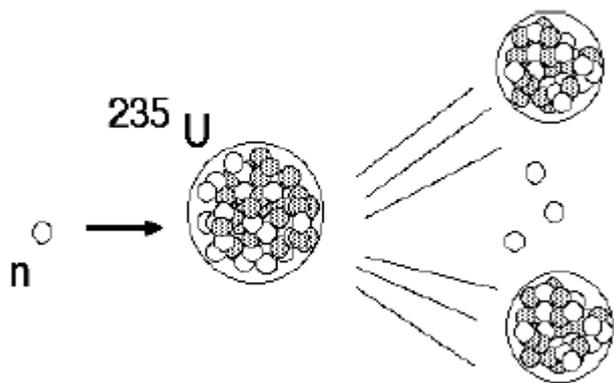
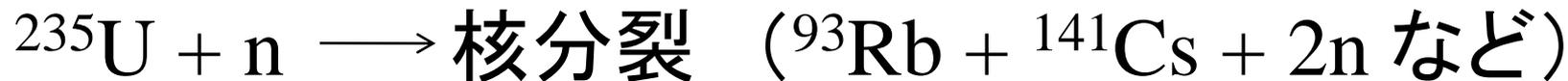
# 社会における原子核

工学・農学・医学への応用

# 社会における原子核

## ▶核エネルギーの利用(原子力発電)

震災以前は  
日本の発電電力  
の約30%



分裂すると軽くなる

$$E = mc^2 \quad (\text{質量自体がエネルギー})$$



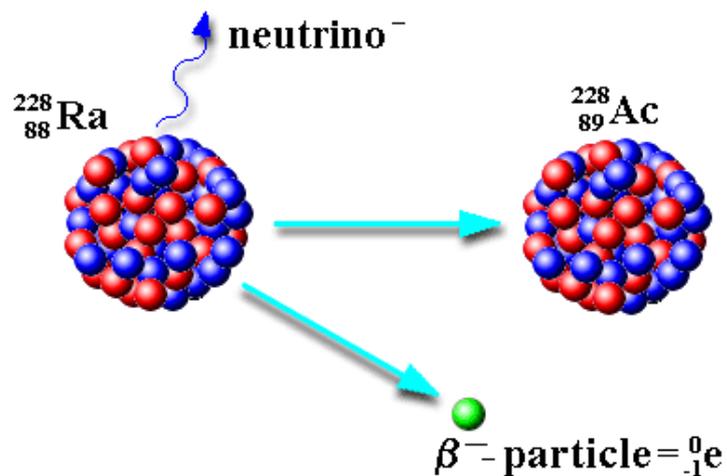
質量の違いを熱エネルギーとして  
取り出すのが原発

# 放射線って何？

自然界に存在する原子核は、たいていのものが安定：性質が変わったりはしない。

→ ところが、(原発などで)原子核が人工的に作られると、その原子核は不安定な場合が多い

→ 安定な原子核に変わろうとする。  
この時に、放射線を出す。

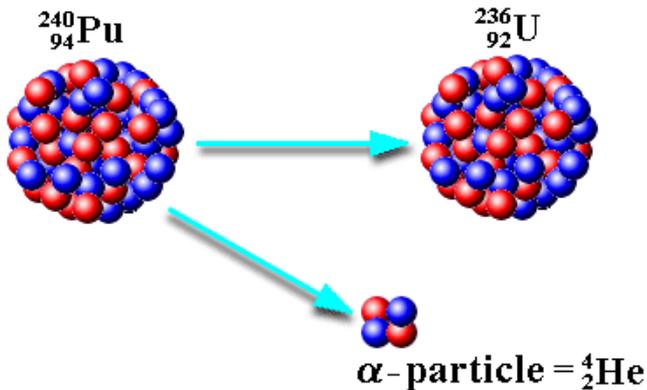


# 放射線とは

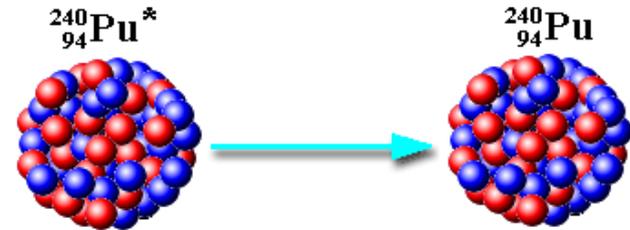
原子核の崩壊現象に伴って放出される  
粒子・電磁波

$\alpha$ 崩壊 (陽子が多い原子核)

$\gamma$ 崩壊 (原子核の励起状態)



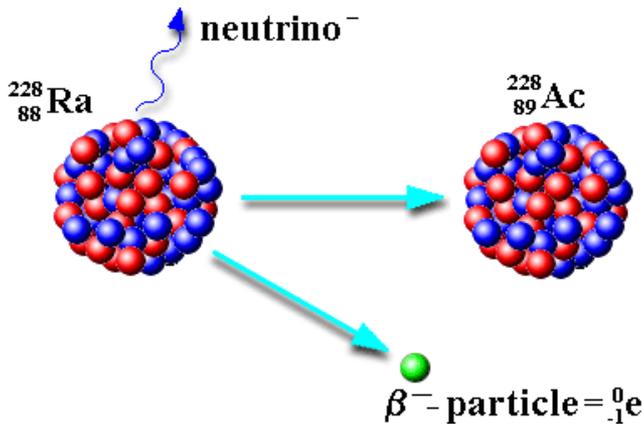
$\alpha$ 線 ( $^4\text{He}$  原子核)



$\gamma$ -radiation: high-energy  
electromagnetic waves

$\gamma$ 線 (高エネルギー  
電磁波)

$\beta$ 崩壊 (中性子が多い原子核)



$\beta$ 線 (電子)

# 社会における原子核

## ➤ 放射線の利用

### 工業での利用

- 航空機や船のエンジンの非破壊検査
- トレーサーとしての利用
- 厚さの計測
- タイヤなどの材質強化

### 農業での利用

- じゃがいもの発芽をおさえる
- 品種改良
- 害虫駆除

### 医療での利用

- レントゲン、CTスキャン
- **がん治療**
- 注射針や手術用器具の滅菌



耐塩性系統  
重イオン照射したM1耐塩性候補群  
品種改良でできた耐塩性イネ  
(理研仁科加速器センター)

### その他

- 三味線の糸の強化
- 年代測定

# ゴーヤ



1993年までは沖縄に行かなければゴーヤは食べられなかった。

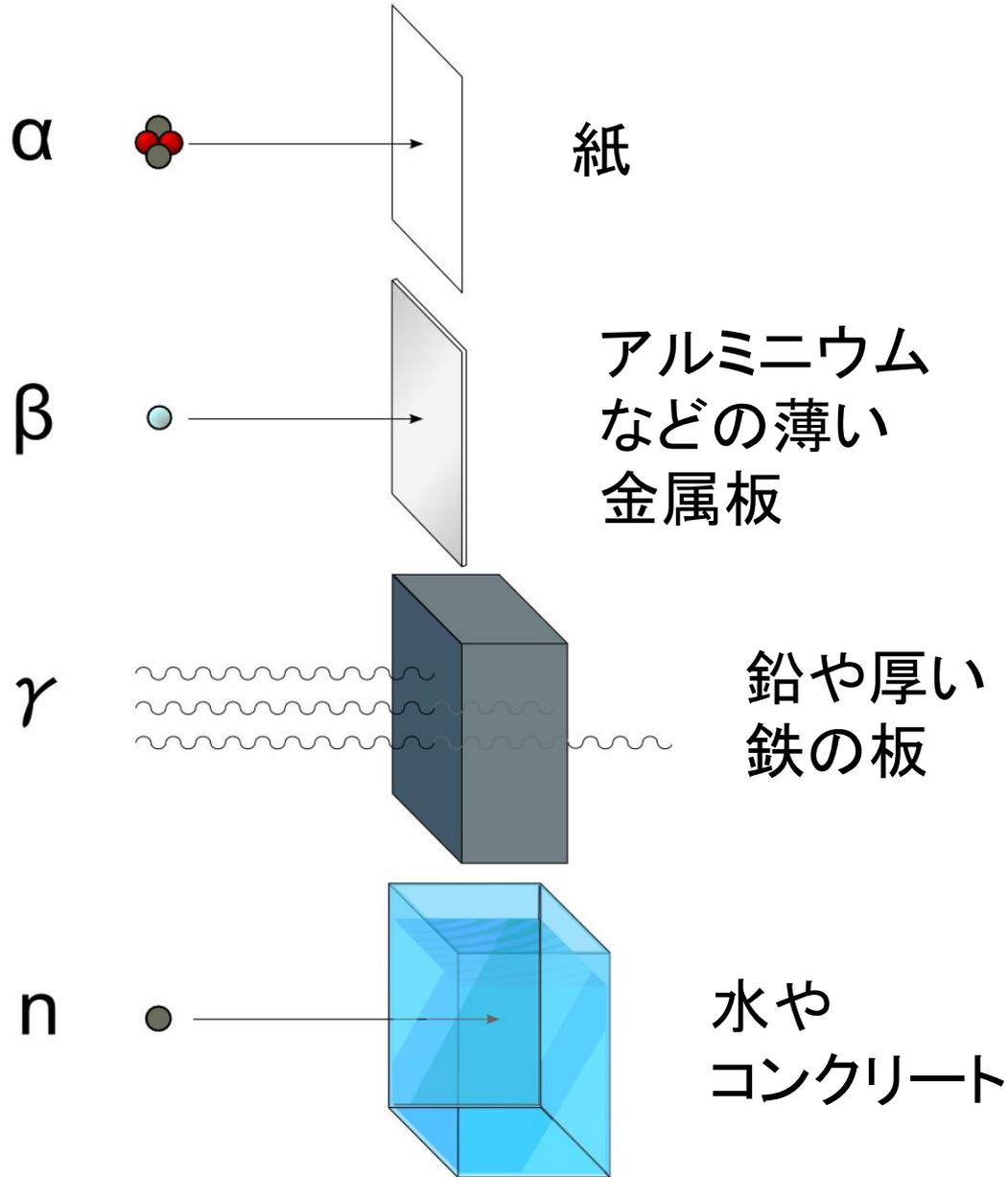


ウリミバエのため



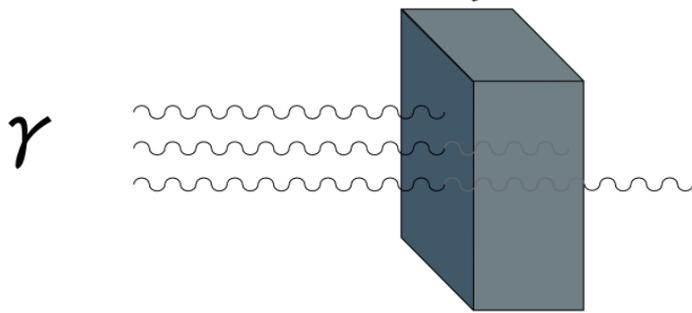
- 放射線をあててウリミバエが子孫を残せなくした。
- 根絶に成功。県外出荷が可能になった。

# 放射線の透過能力



# 放射線の工業的応用

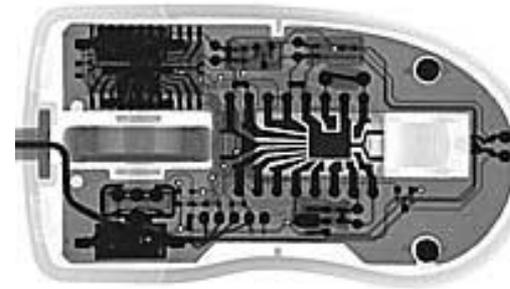
放射線の透過能力 → 工学的応用に重要



$\gamma$ 線やX線は物体を容易に透過する性質を持つ



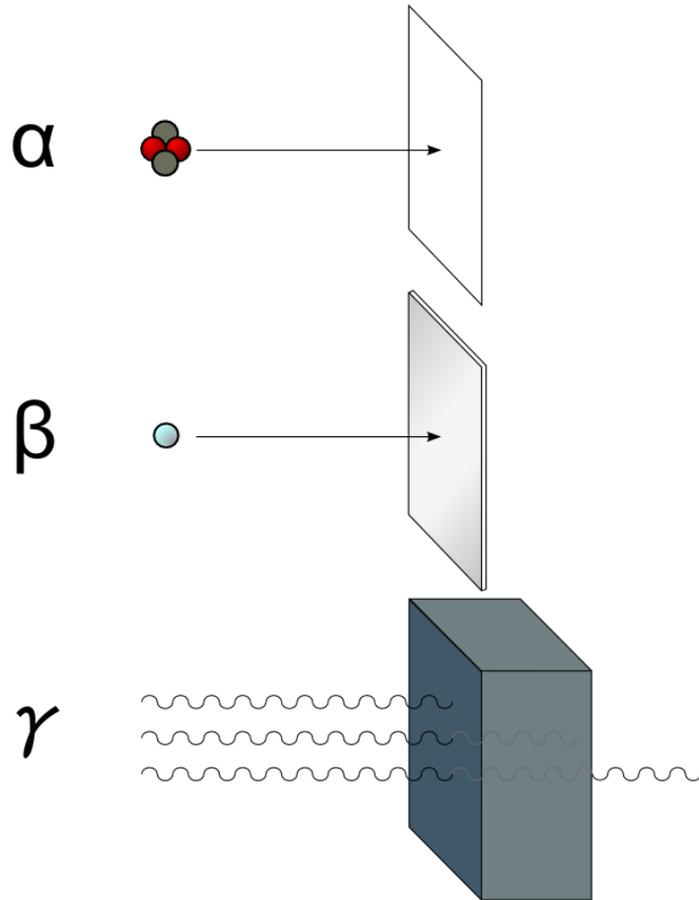
X線



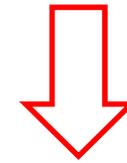
[http://www.enepa.ne.jp/radio/radio\\_16.html](http://www.enepa.ne.jp/radio/radio_16.html)

- 物を壊さずに検査ができる(非破壊検査)。
- 航空機や船のエンジンの検査に使える(目に見えない傷の発見など)。

# 厚さの計測



物体を透過した後の  
 $\beta$ 線や $\gamma$ 線の量  
 $\alpha$ 線のエネルギー  
の減少



物体の厚さ

- 薄いもの  
(ティッシュペーパーなど)
- 灼熱の鉄板

など普通では測りにくいもの  
の厚さが計測できる

# 材質強化

高分子材料(ゴムやプラスチック)に $\gamma$ 線や電子線を照射

➡放射線の電離作用により電子のシャワーが発生

➡高分子材料と化学反応(強度や耐熱性の向上)



タイヤ



発砲プラスチック



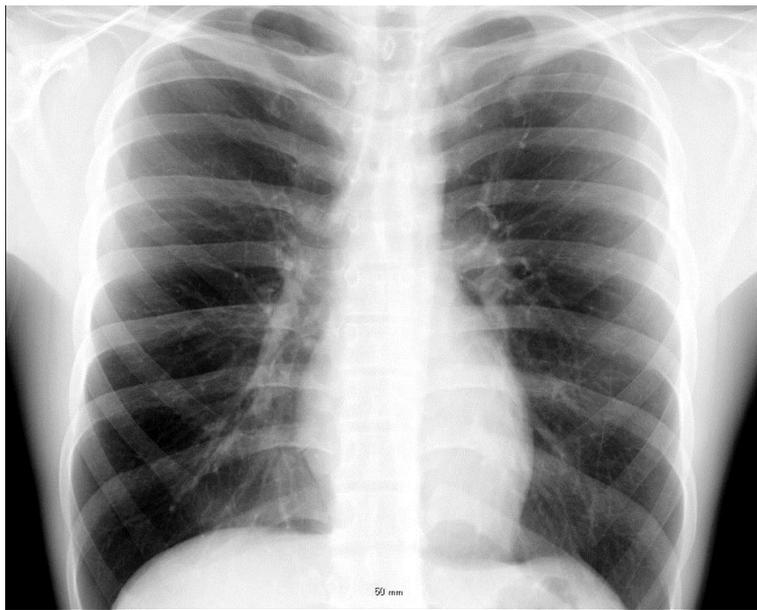
電線の被覆部

[http://www.atomin.gr.jp/website/support/riyou\\_all/riyou\\_04.html](http://www.atomin.gr.jp/website/support/riyou_all/riyou_04.html)

その他にも三味線のナイロン糸の強化などにも

# 放射線の医療への応用

一番身近な例:レントゲン(X線)により身体の内部を映像化



成人男性の胸部X線写真

この他にも、  
微量の放射性物質を体内に  
投与し、そこから出てくる放射  
線を見ることにより病気を診断

例)  $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$  の投与による骨病変  
の診断

# 放射線による

- がん細胞の破壊
- 注射針等の滅菌（微生物の死滅）

煮沸消毒できない材質で出来た用具に利用



ガンマ線滅菌・電子線滅菌

（工場で梱包された段ボールに入ったまま滅菌して出荷される。）

# どうして放射線でがん細胞や微生物が殺せるのか？

放射線：電離作用を持つ



(人体の80%は水)

+



$\text{H}_2\text{O}^+$ ,  $\text{H}_2\text{O}^-$  は不安定



ラジカル(不対電子を持つ原子や分子: 化学的にとても活性)の形成

ラジカルが細胞内の(DNAなどの)分子(RHと表わす)と反応



DNAの破壊  細胞の死

# がんの治療法

- 外科的療法（手術）
- 放射線療法
- 化学療法（抗がん剤）

• これらを組み合わせて治療が行われることもある。

• 放射線治療を受ける患者の数：

（日本：全体の約25%、アメリカ：全体の60%以上）

## 放射線療法の種類

- 放射線治療（ $\gamma$ 線、X線）
- 陽子線治療
- 重イオン線治療（炭素ビーム）
- 中性子線治療（ホウ素中性子捕捉療法: BNCT）

## がんの放射線治療( $\gamma$ 線、X線)

放射線を用いてがん細胞を破壊する

↔ 問題点: 放射線は正常細胞も破壊してしまう

### 解決策

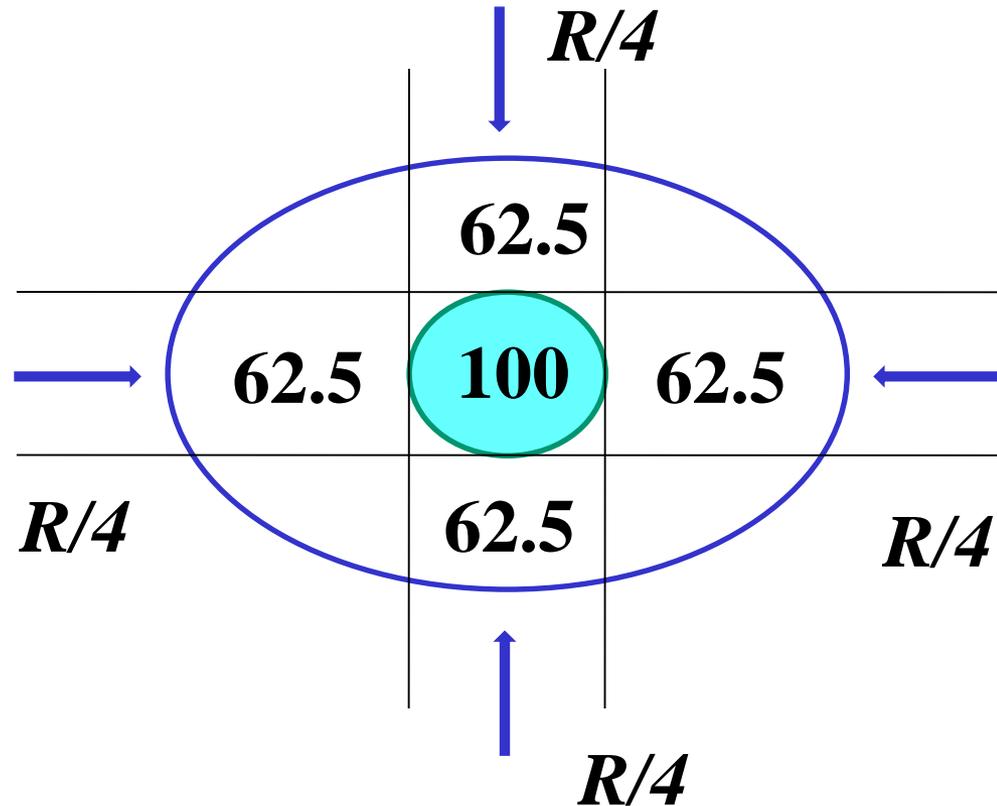
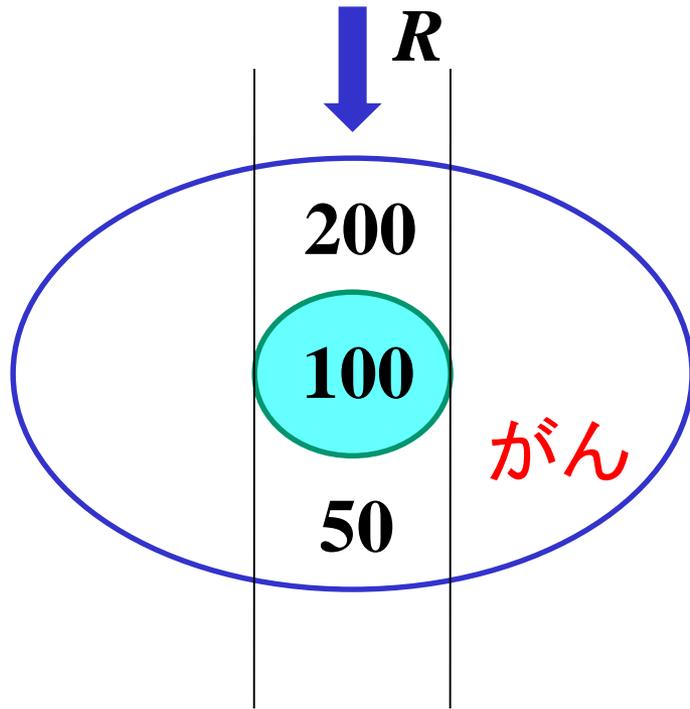
- 複数の方向から放射線を照射する
- 弱い放射線を繰り返し何回か照射する

# 放射線を用いてがん細胞を破壊する

↔ 問題点: 放射線は正常細胞も破壊してしまう

## 解決策

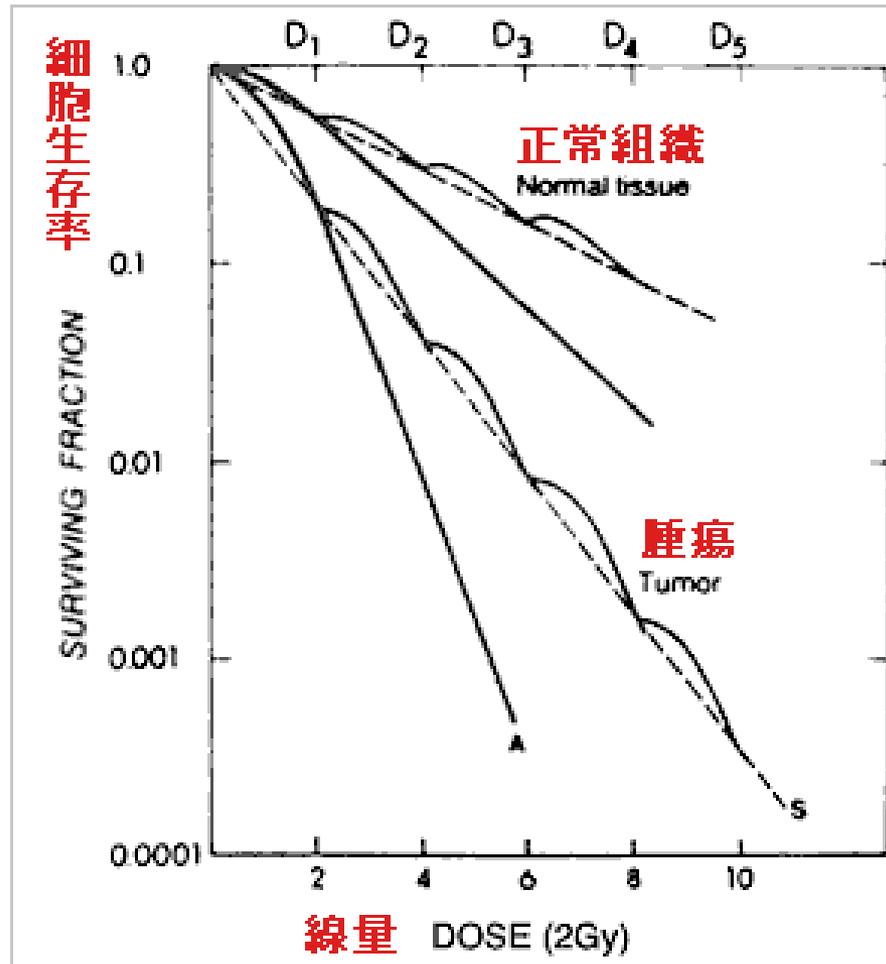
- 複数の方向から放射線を照射する



# 放射線を用いてがん細胞を破壊する

↔ 問題点: 放射線は正常細胞も破壊してしまう

**解決策** ● 弱い放射線を繰り返し何回か照射する

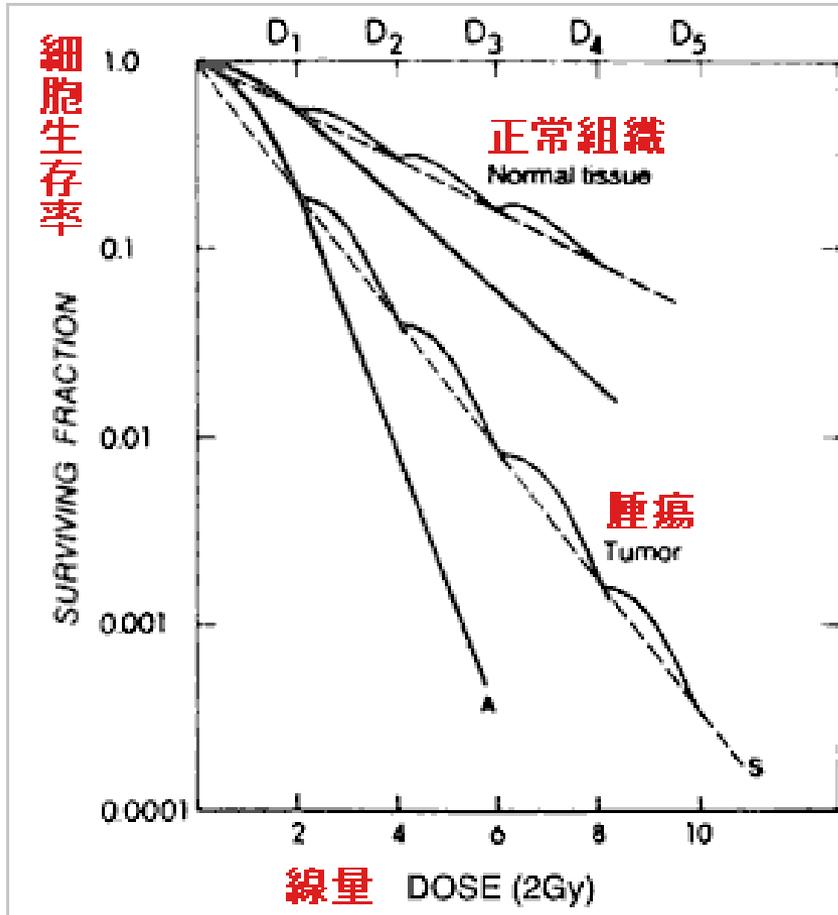


➤ 細胞は放射線で壊されても回復する能力がある

➤ 正常細胞に比べて、がん細胞は回復力が小さい

➤ 弱い放射線を繰り返し照射し、正常細胞の回復を待ちつつがん細胞を徐々に破壊

## (補注)



- 細胞は放射線で壊されても回復する能力がある
- 正常細胞に比べて、がん細胞は回復力が小さい

[http://www.accuthera.com/R\\_therapy/2.html](http://www.accuthera.com/R_therapy/2.html)

がん: 細胞分裂の暴走 (細胞分裂が盛ん)

- ➡ 細胞分裂の間は細胞は不安定
- ➡ 放射線の影響を強く受け壊れやすい

# 放射線治療の例

(東北大学病院がんセンターのHPより)

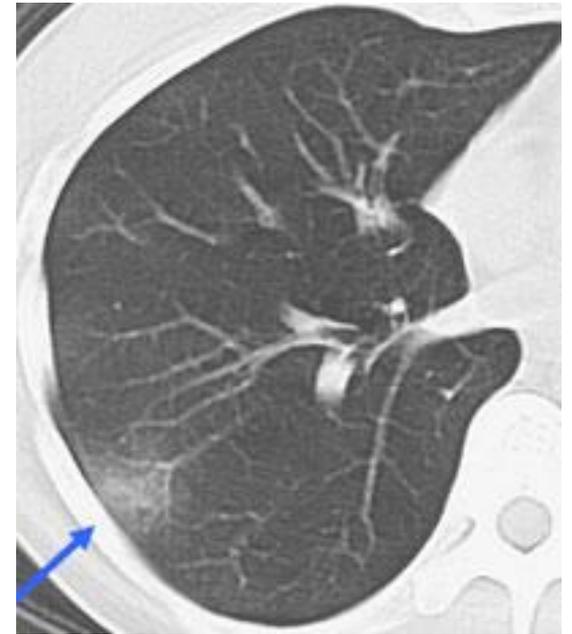
[http://www.hosp.tohoku.ac.jp/cc/gan\\_qa/gan\\_01.html](http://www.hosp.tohoku.ac.jp/cc/gan_qa/gan_01.html)



肺がんのCT画像  
(治療前)



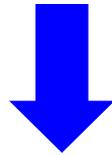
放射線の線量分布  
(治療計画)



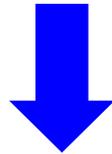
治療後のCT画像

## 粒子線によるがん治療

- 消化管やせき髄など放射線の影響を受けやすい臓器のすぐそばのガン
- 身体の比較的深い位置にあるガン
- 放射線抵抗性のガン(骨肉腫や筋肉のガン)



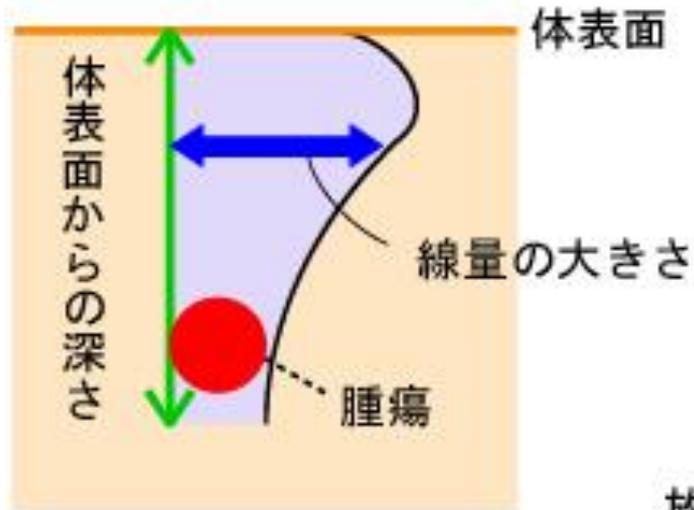
がん治療に十分な放射線量を目的の部分に照射することができない



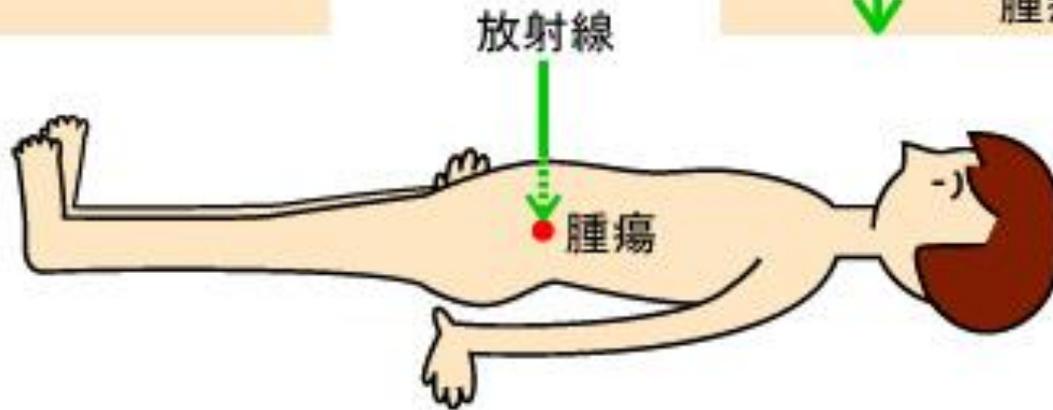
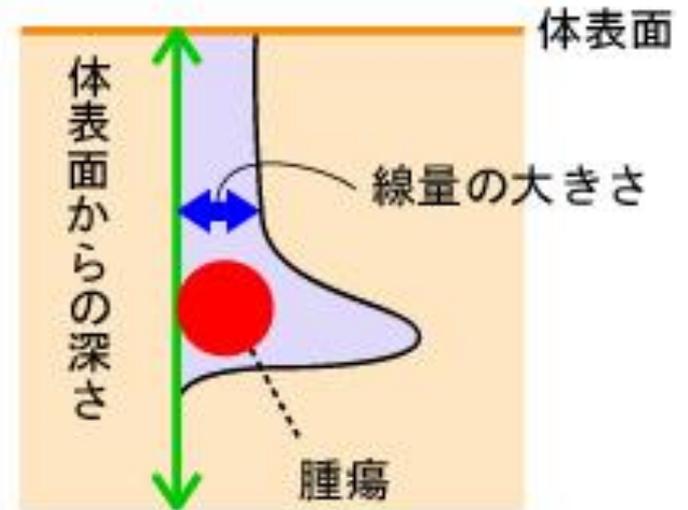
粒子線(陽子線、炭素線)による治療

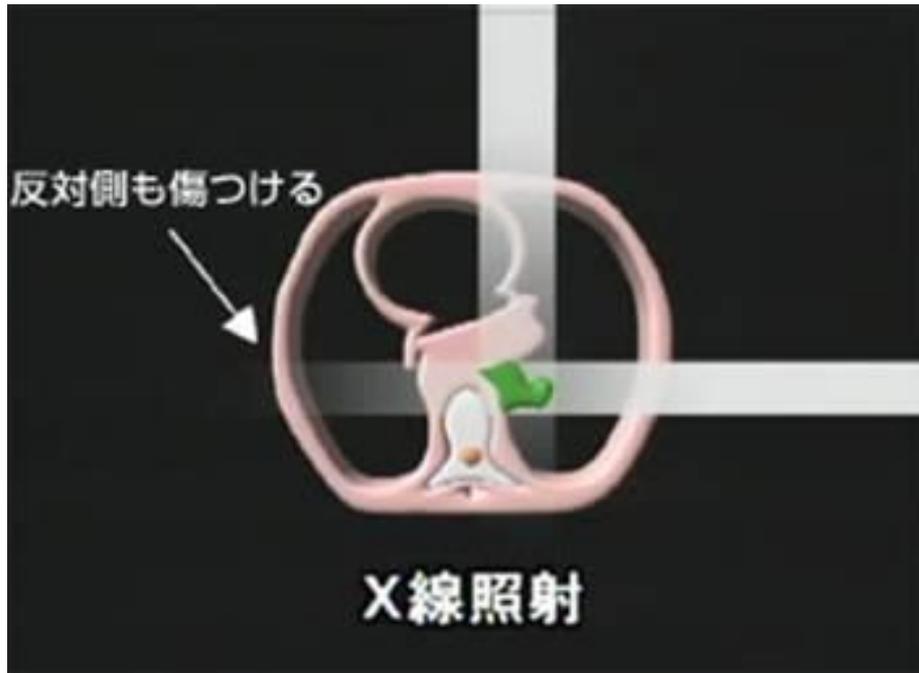
# 粒子線の特徴

エックス線・ガンマ線



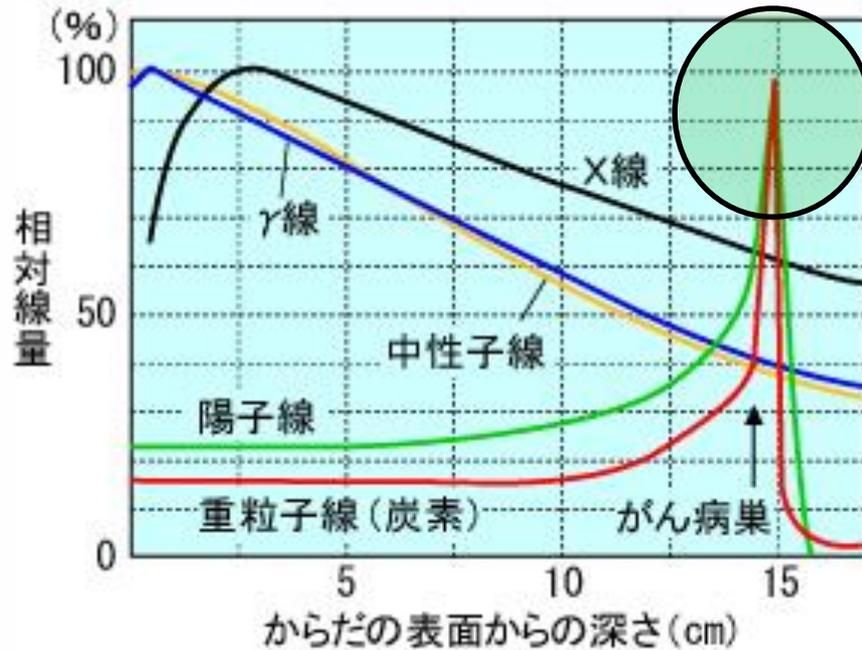
陽子線・重粒子線





<http://www.radiol.med.tohoku.ac.jp/juryushi/juryushisen.html>

## 各種放射線の生体内における線量分布



ガンマ線や速中性子線のエネルギーは身体表面近くでもっとも強く、深く進むにつれて減弱するが、陽子線や重粒子線の場合は、エネルギーに応じてある深さで急に強くなり、エネルギーのピークがみられる。このピークの部分をがんの患部に合わせることで、正常組織の障害を少なくすることができる。

ブラッグ・ピーク

ベーテ・ブロッホの公式

$$-\frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{v^2}$$

(電離のしやすさは  $1/v^2$  に比例)

\* 速さが小さいほどより長い時間物質と相互作用する

粒子線が体内で減速するにつれ細胞の破壊能力が大きくなる

\* ブラッグ・ピークの位置は粒子の初期速度で決まる

[トップページ](#)  
HOME

[センター概要](#)  
introduction

[陽子線治療について](#)  
about the therapy

[陽子線で治療できるがん](#)  
indication

[治療を希望される方へ](#)  
conditions

[医療関係者の方へ](#)  
medical

# 南東北 がん陽子線治療センター

■ Japanese ■ English ■ Chinese ■ Russian



## 切らずに治療ができる

陽子線治療 ProtonTreatment



陽子線治療は、従来の放射線治療では治療が困難な疾患にも、すぐれた効果を発揮します。

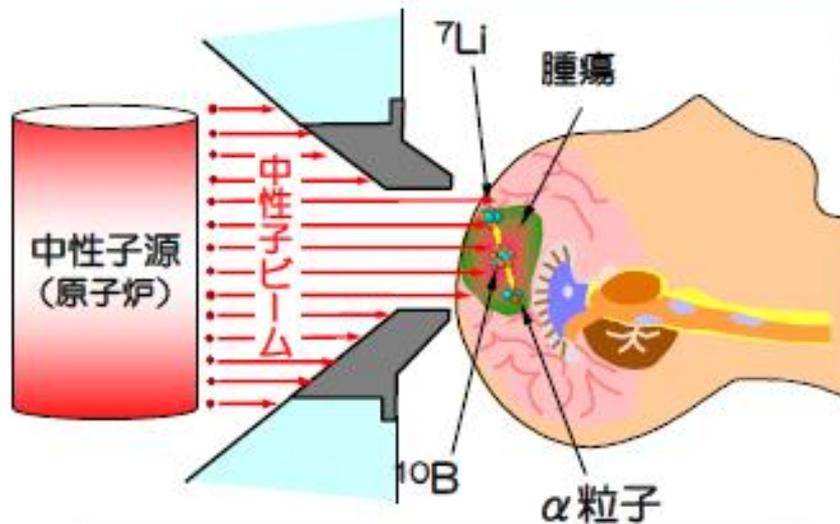
陽子線治療の有効性が確認されている代表的な疾患は、前立腺がん・肝がん・頭蓋内腫瘍・頭頸部腫瘍(副鼻腔がんなど)肺がんなどの塊状の腫瘍です。

# ホウ素中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy)

JAEA

資料3

## ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) の原理と特徴



### BNCTの原理

1. がん細胞に集まりやすい $^{10}\text{B}$ 化合物を患者に投与\*
2. 患部に中性子ビームを照射
3.  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応で生じる $\alpha$ 粒子とLiでがん細胞を選択的に破壊\*\*

### BNCTの特徴

- ・がん細胞のみを選択的に破壊でき、細胞レベルでのがん治療が可能
- ・1回～数回での照射で治療が完了
- ・治療後のQOLが高い\*\*\*

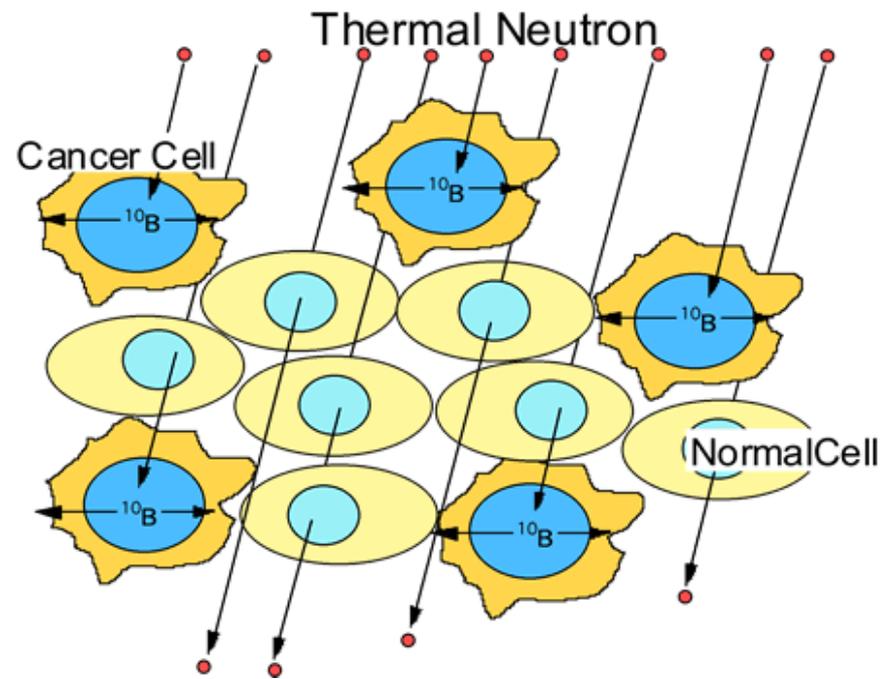
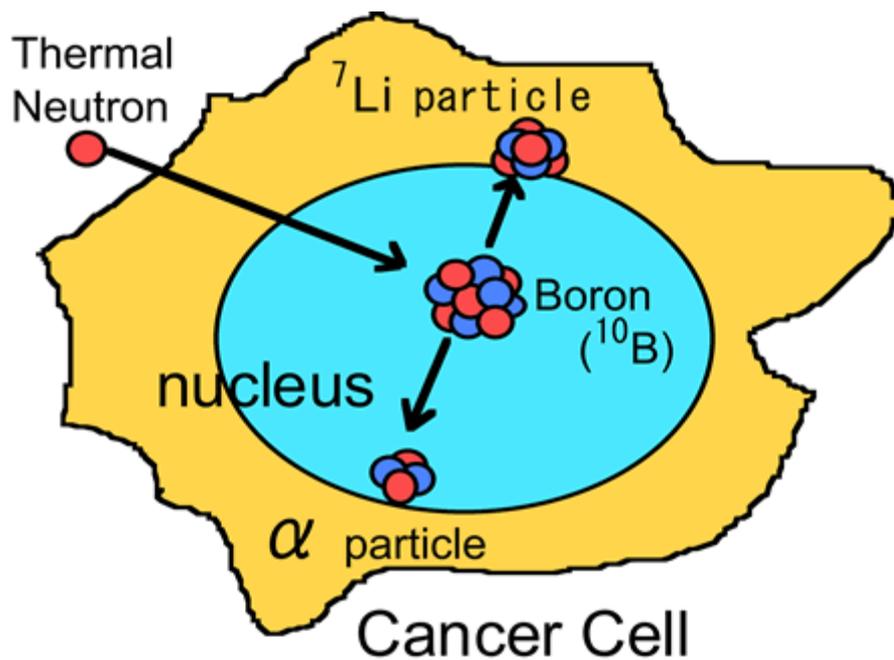
\*\*\* BNCTは腫瘍細胞のみを選択的に破壊することができるため、周囲の健全な組織にダメージを与えることなくがんを治療できるため、治療後のQOLが良い。

\* 正常な脳細胞には、血液から異物を取り込まない血液脳関門 (Blood-brain Barrier: BBB) と呼ばれる機構があるが、がん細胞はこの血液脳関門が壊れている。悪性脳腫瘍に対して用いられるホウ素化合物は、壊れた血液脳関門を通過してがん細胞に取り込まれ集積する。また脳腫瘍以外のがんにも用いられているホウ素化合物は、 $^{10}\text{B}$ とアミノ酸を結合させることで、がん細胞がアミノ酸を取り込みやすい性質を利用してがん細胞に多く集積させることができる。

\*\* BNCTは、がん細胞に選択的に集まるホウ素化合物を患者に投与しておき、原子炉から発生する中性子ビームを患部に向けて照射する。照射された熱中性子とがん細胞内にあるホウ素 ( $^{10}\text{B}$ ) とが  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  反応を起こしてリチウム原子核と  $\alpha$  粒子を放出する。このとき  $\alpha$  粒子、リチウム原子核が細胞組織内でエネルギーを失うまでに移動する距離は約  $10\ \mu\text{m}$  程度しかなく、これはがん細胞の径にほぼ等しいため、周囲の正常細胞にはダメージを与えることなくがん細胞のみを破壊できる。

### BNCTの適用

悪性脳腫瘍、悪性黒色腫 (皮膚がん)、頭頸部がん、肺がん、肝がん 等



<http://www.osaka-med.ac.jp/deps/neu/omcBNCT/index.html> (大阪医大)



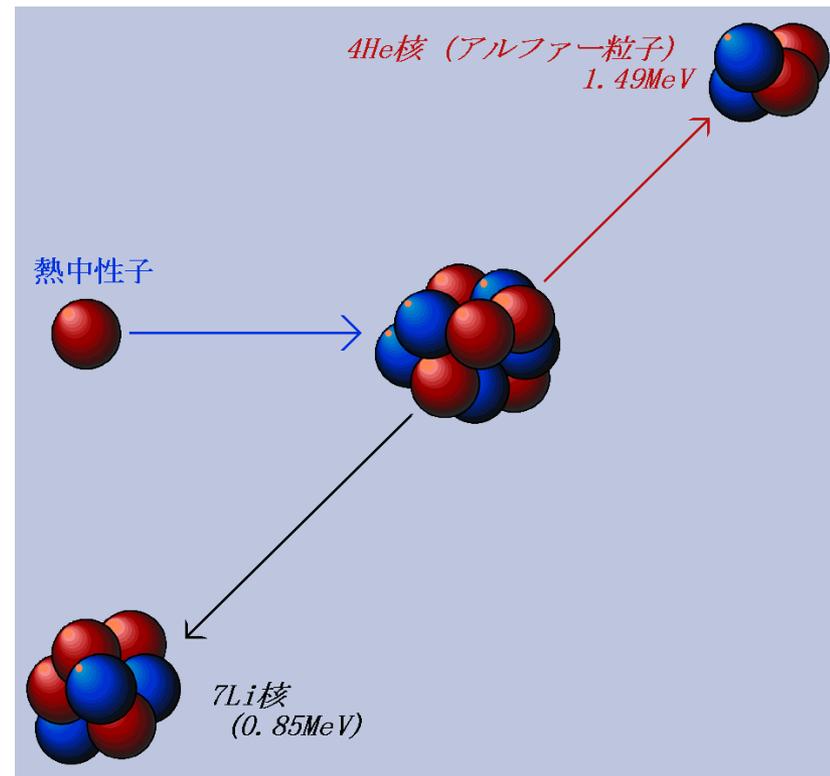
飛行距離:  $5 \mu\text{m}$  ( ${}^7\text{Li}$ ),  $9 \mu\text{m}$  ( ${}^4\text{He}$ )

➡ 腫瘍細胞1個分の大きさ

➡ 腫瘍細胞のみを細胞レベルで選択的に破壊

# まとめ: 原子核の世界

- 原子核は**量子力学の不思議な世界**に支配されています。
- 原子核には**量子力学の不思議な現象**が豊富に見られます。
- 私たちは**量子力学を駆使して**原子核の世界を明らかにする研究をしています。
- 原子核物理学は**工学・農学や医学への応用の例**が数多くあります(**がん治療**など)。



## 参考資料

➤ 今回のスライド

<http://www.nucl.phys.tohoku.ac.jp/~hagino/shizen14.pdf>

➤ 東北大学サイエンスカフェ

「日本の名前がつくかもしれない!?～新元素113番のはなし～」

[http://youtu.be/\\_CzX\\_zocR\\_Y](http://youtu.be/_CzX_zocR_Y) (Youtubeの動画)

➤ 東北大学病院がんセンター

<http://www.hosp.tohoku.ac.jp/cc/index.html>

➤ 南東北がん陽子線治療センター

<http://www.southerntohoku-proton.com/>

出席の代わりに感想を書いてください  
(所属、学籍番号、名前を明記してください)

- ✓ 講義の感想
- ✓ 一番印象に残ったこと(びっくりしたこと)
- ✓ この講義に出てよかったなと思ったこと

などなど。