

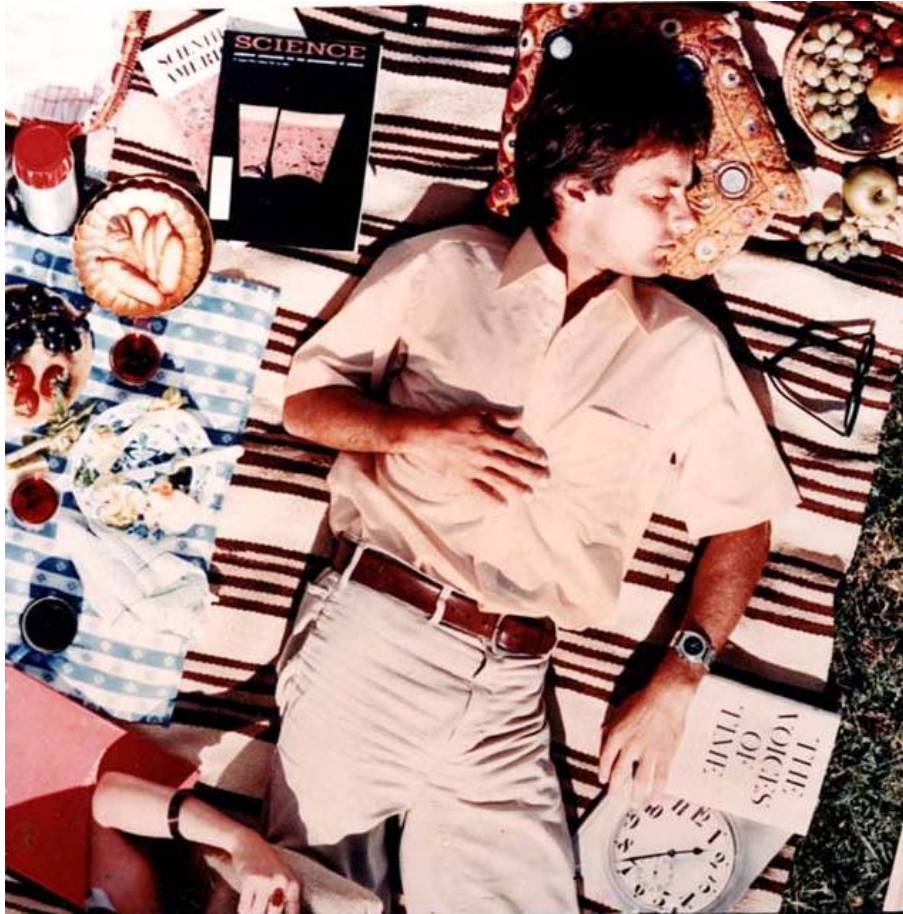
原子核物理学とがん治療

- 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)

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

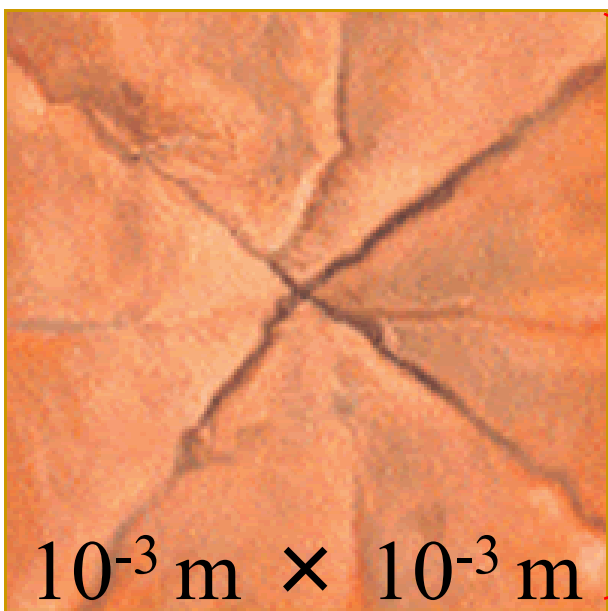
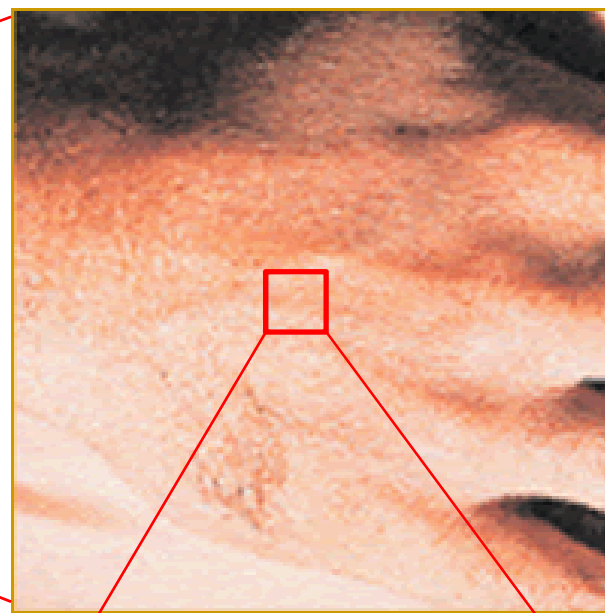


- 1977 年にアメリカで作られた教育映画
- 公園で昼寝している人がスタート
- そこから段々スケールが大きくなり宇宙空間へ
- 次にスケールが小さくなり原子・原子核の世界へ

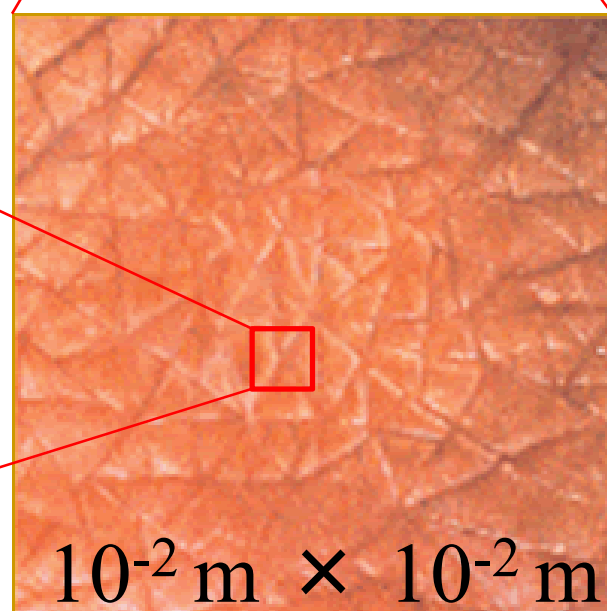
$10^0 \text{ m} \times 10^0 \text{ m}$



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



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



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

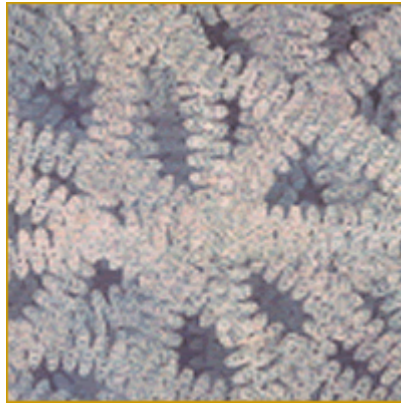
このまま続けると。。。。

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



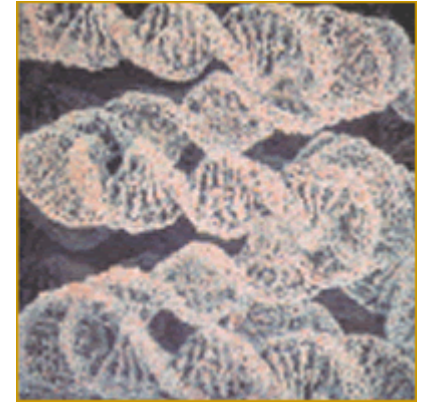
細胞

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



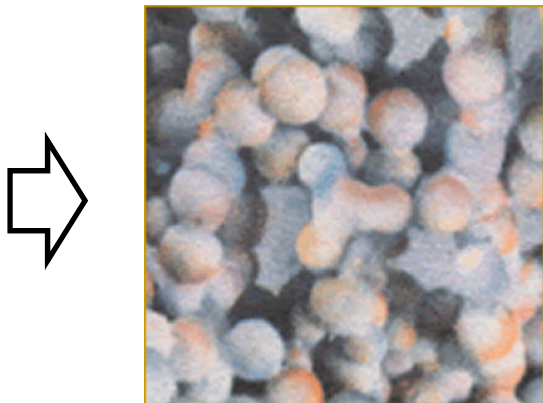
絡み合うDNA

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



DNAの2重らせん
構造

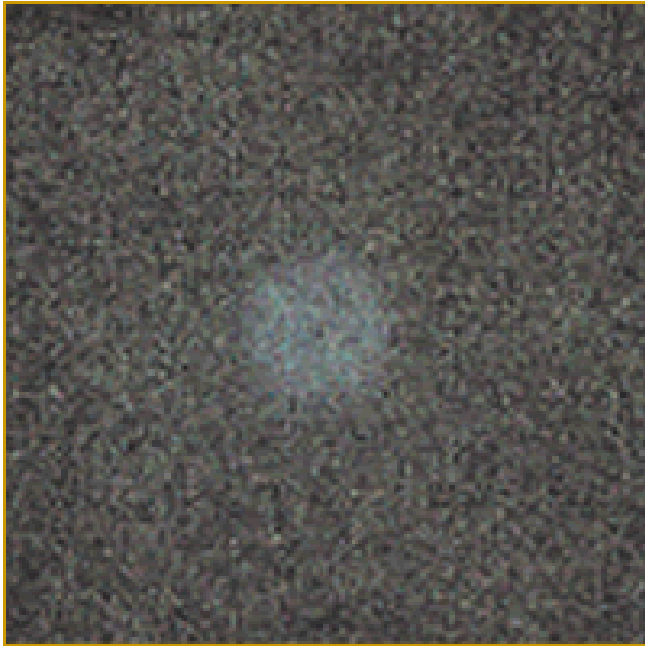
$10^{-9} \text{ m} \times 10^{-9} \text{ m}$



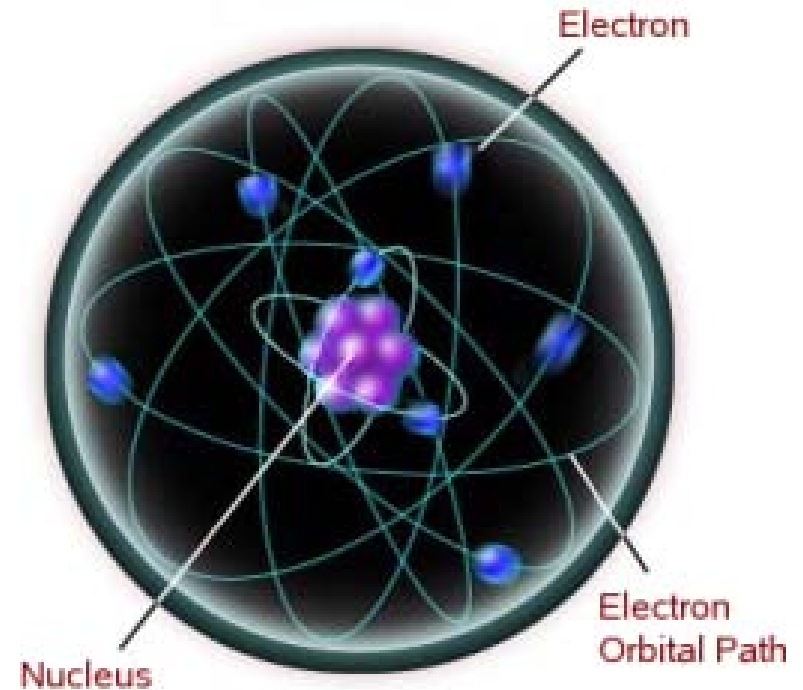
DNAは高分子
生体物質

分子は原子の集合体

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

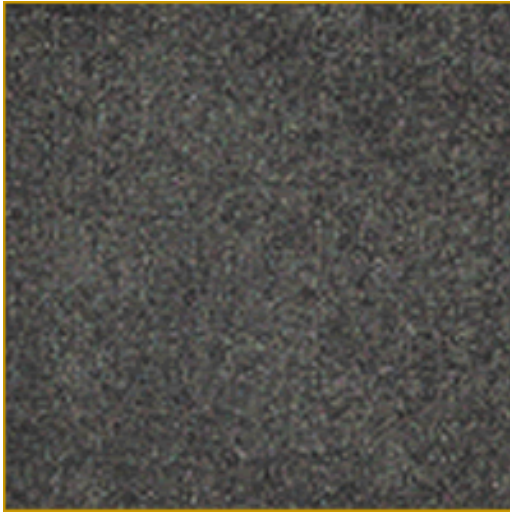


原子における電子の雲



原子の構造

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



最も内側をまわる
電子の雲

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



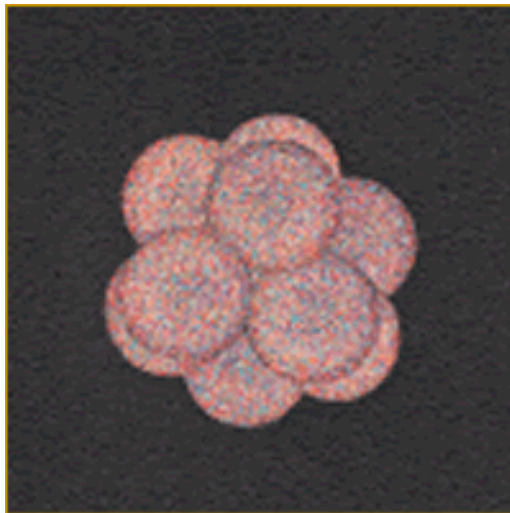
かすかに原子核が
見え始めた

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



だんだんはつきりと
見えてきた

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

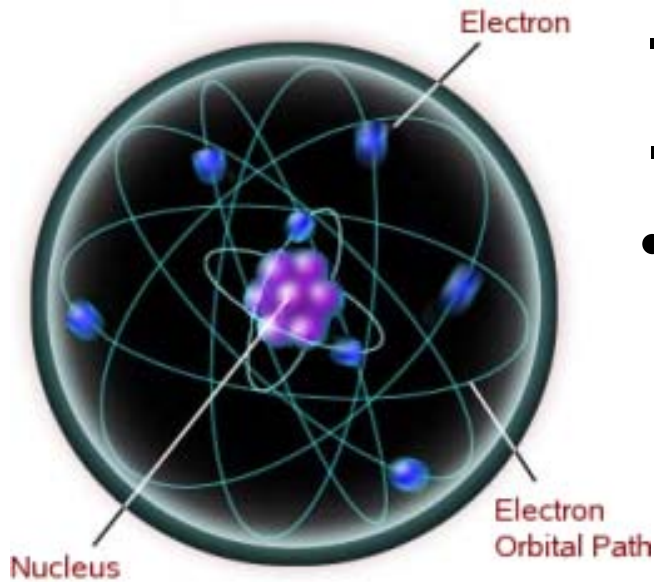


ようやく原子核の構造が
見えた

原子核の構造

✧原子は原子核と電子からできている。

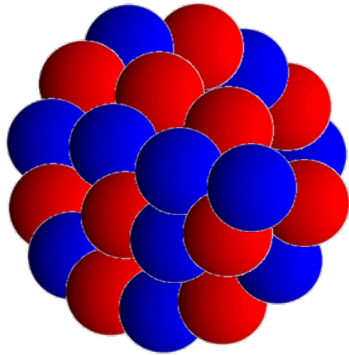
- ・電子はマイナスの電気を帯びている。
- ・原子核はプラスの電気を帯びている。
- ・プラスとマイナスが打ち消しあい、原子は中性



✧原子核は陽子と中性子からできている。

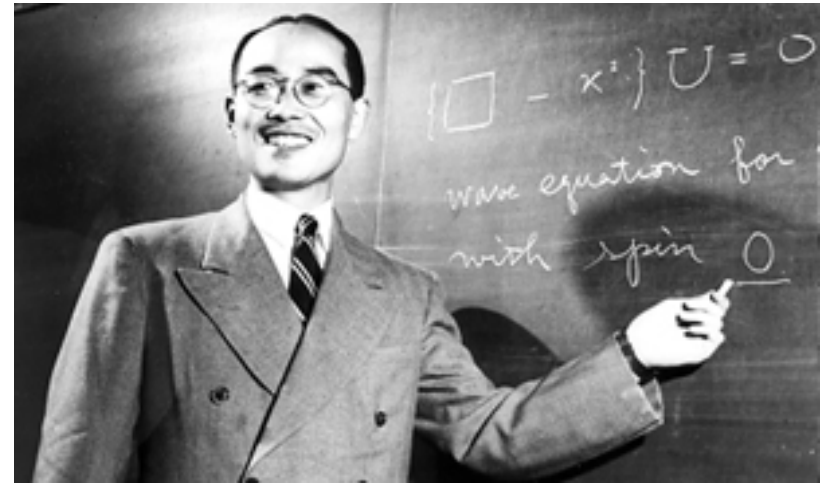
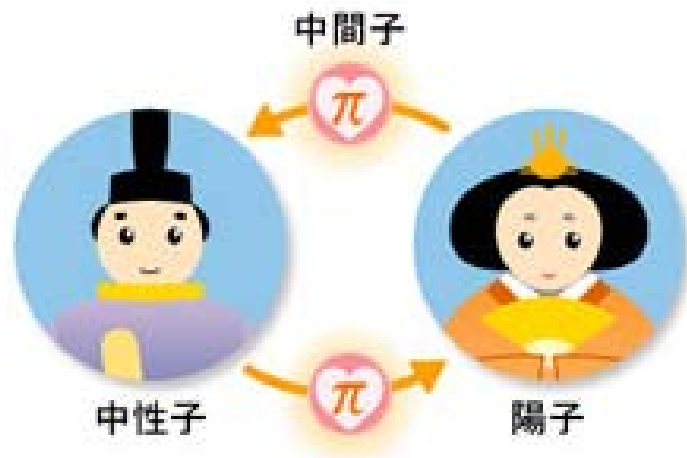
- ・陽子は正の電荷を持ち、中性子は電荷を持たない。
- ・それ以外の性質はほとんど同じ。

Z 個の陽子



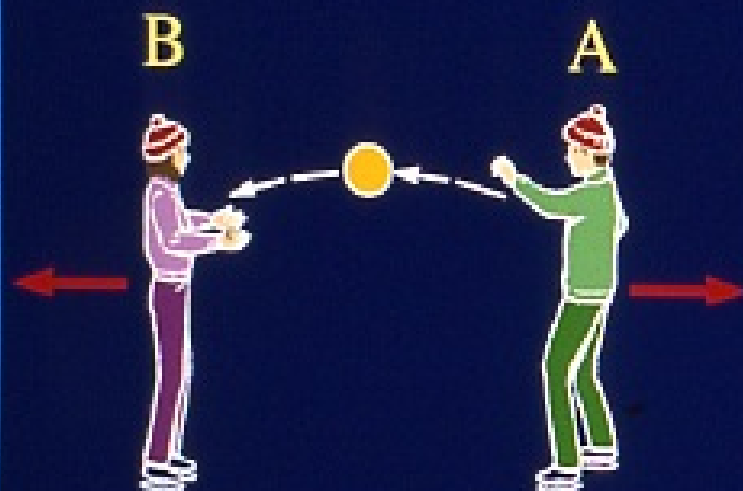
N 個の中性子

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？

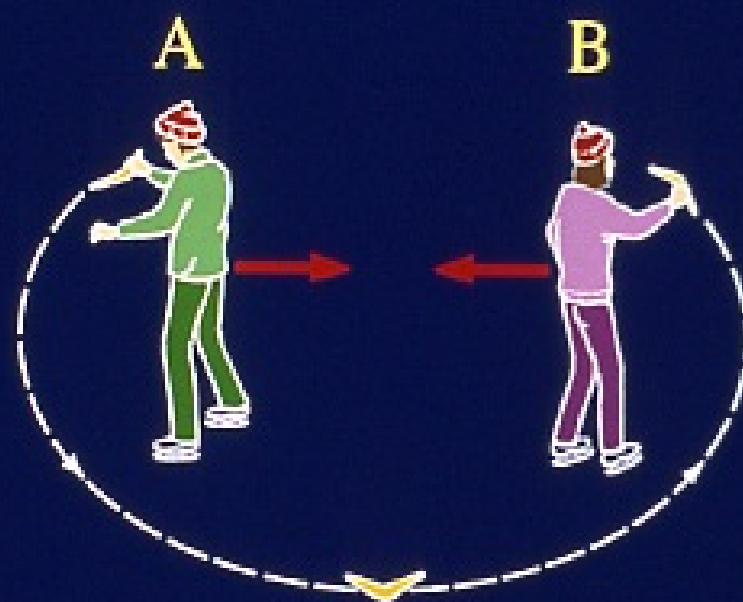


湯川秀樹の中間子理論

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)

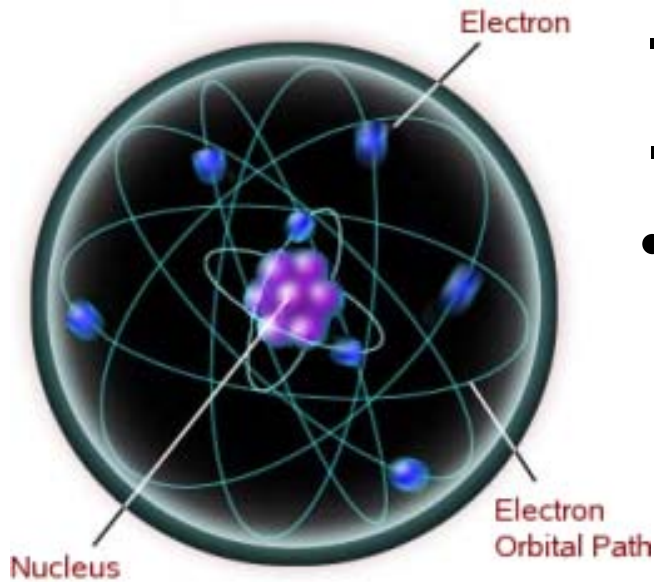


(b)

原子核の構造

✧原子は原子核と電子からできている。

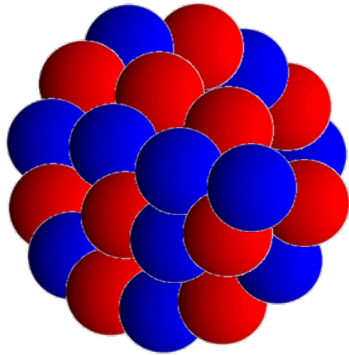
- ・電子はマイナスの電気を帯びている。
- ・原子核はプラスの電気を帯びている。
- ・プラスとマイナスが打ち消しあい、原子は中性



✧原子核は陽子と中性子からできている。

- ・陽子は正の電荷を持ち、
中性子は電荷を持たない。
- ・それ以外の性質はほとんど同じ。

Z 個の陽子



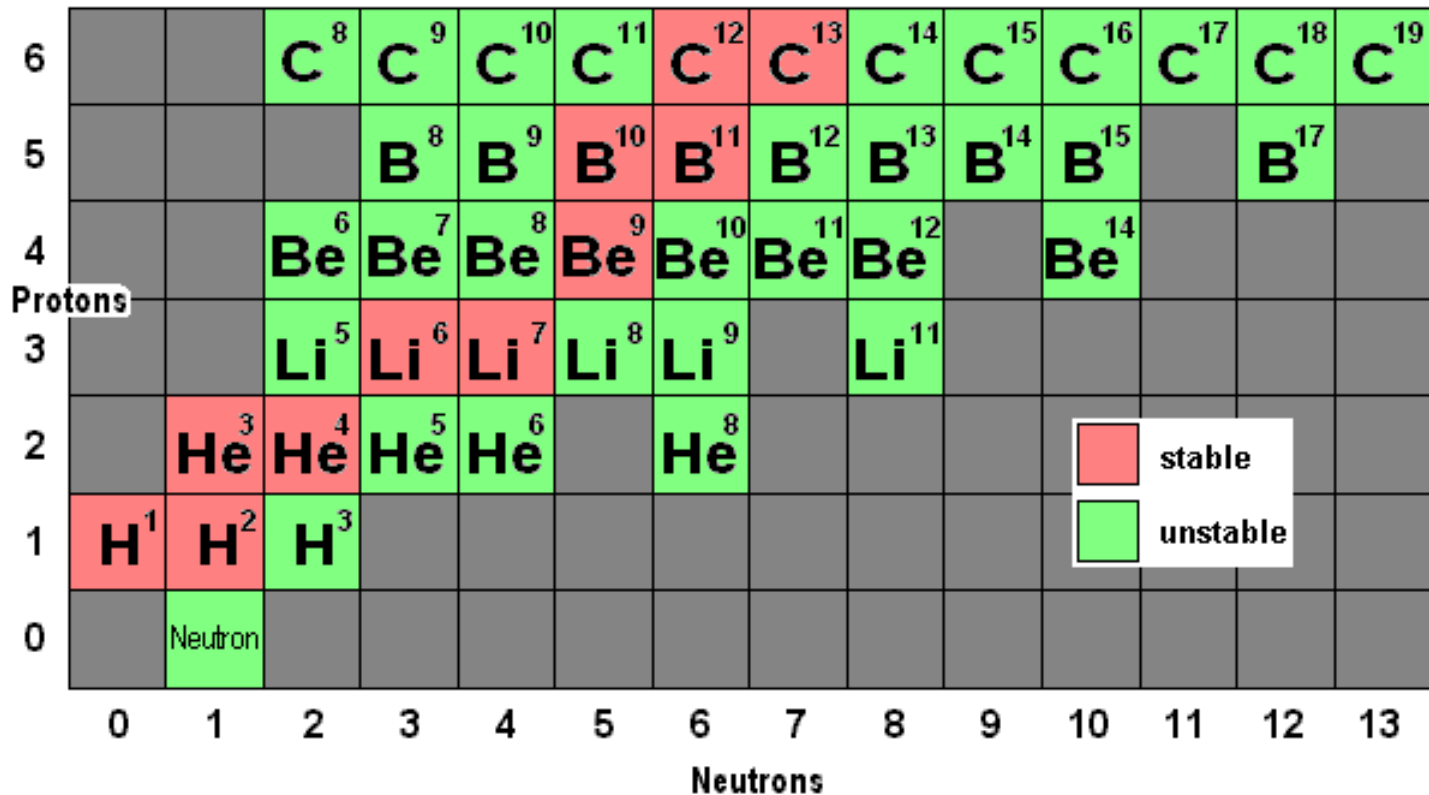
N 個の中性子

核図表

陽子、中性子の組み合わせで原子核が
できている

➡ 2次元平面内で原子核の地図が作れる！
(核図表)

陽子の数(元素の種類)



中性子の数(同位体の種類)

(*) 元素の周期表は本質的に1次元(陽子の数のみ)が関係する)

元素の周期表																	
1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0		
1 H																	2 He
3 Li	4 Be									5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne		
11 Na	12 Mg									13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar		
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
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
55 Cs	56 Ba	L	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
87 Fr	88 Ra	A															
		L	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
		A	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

典型金属元素

半金属元素

非金属元素

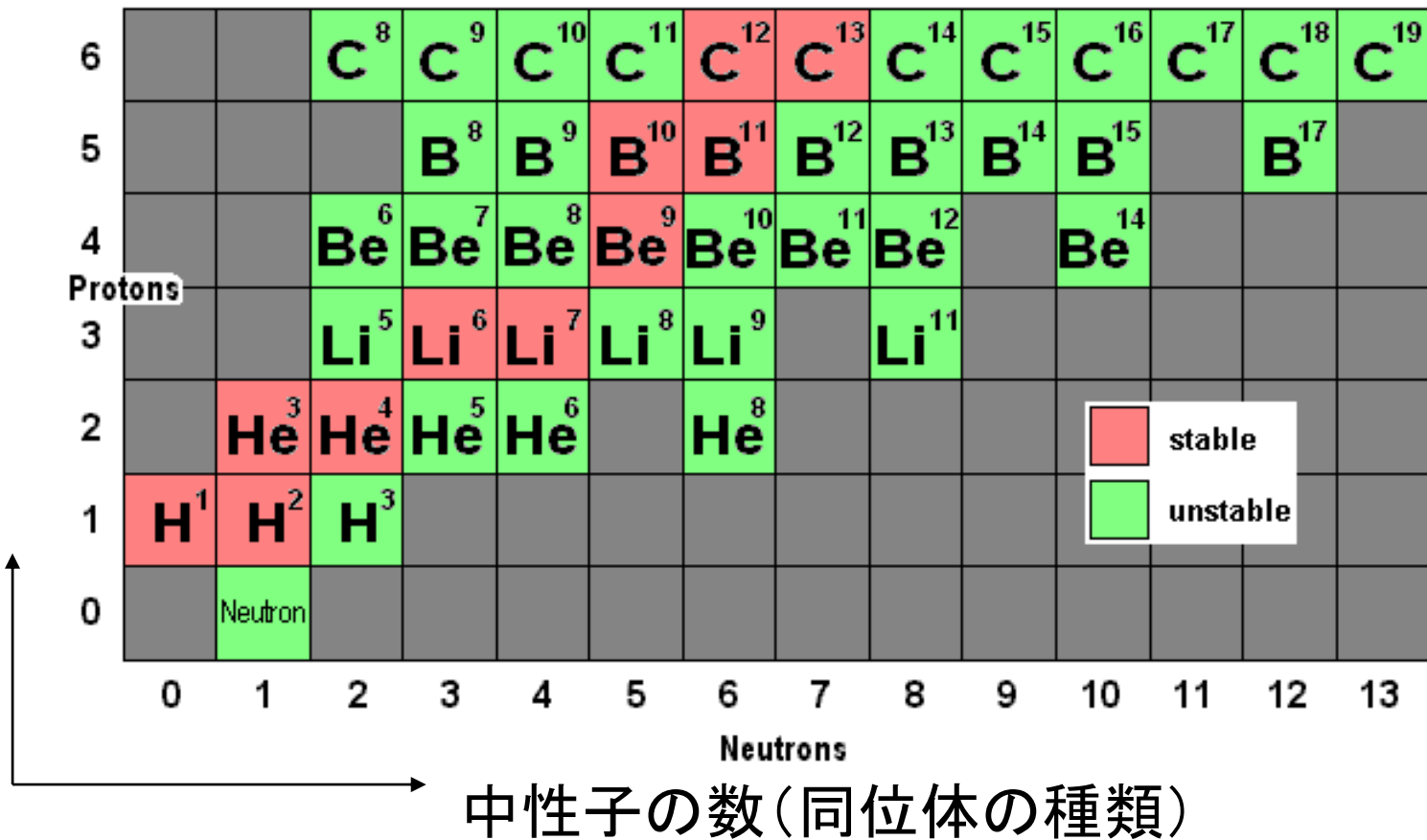
遷移金属元素

希ガス

Copyright © 2002 FRCO

核図表

陽子の数(元素の種類)

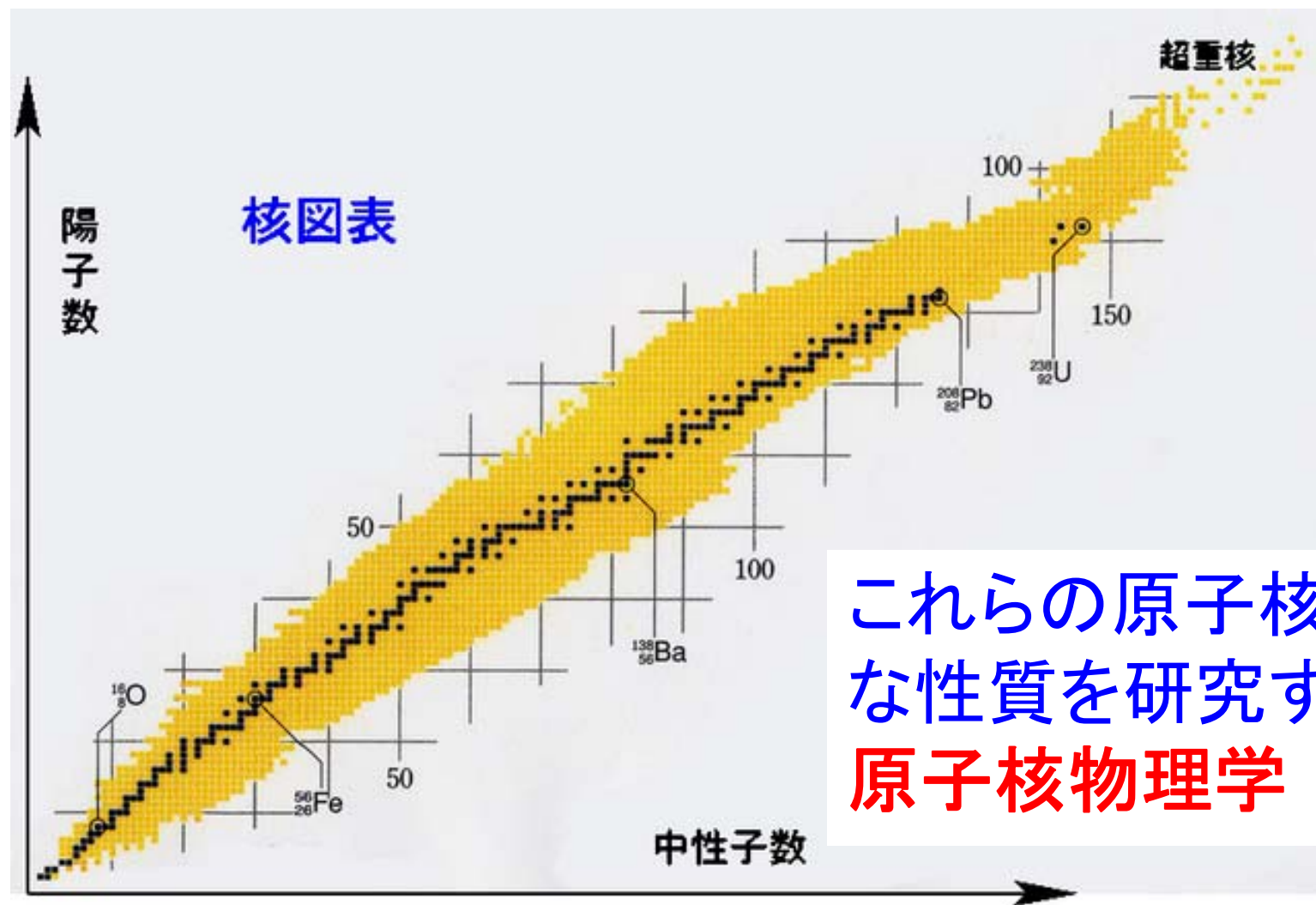


核図表は2次元。

例えば、炭素元素にも様々な種類(同位体)

- ・安定な(自然界に存在する)原子核: 287 種類
- ・現在までに確認された原子核: 約 3,000 種類
- ・存在が予想されている原子核: 約 7,000 ~ 10,000

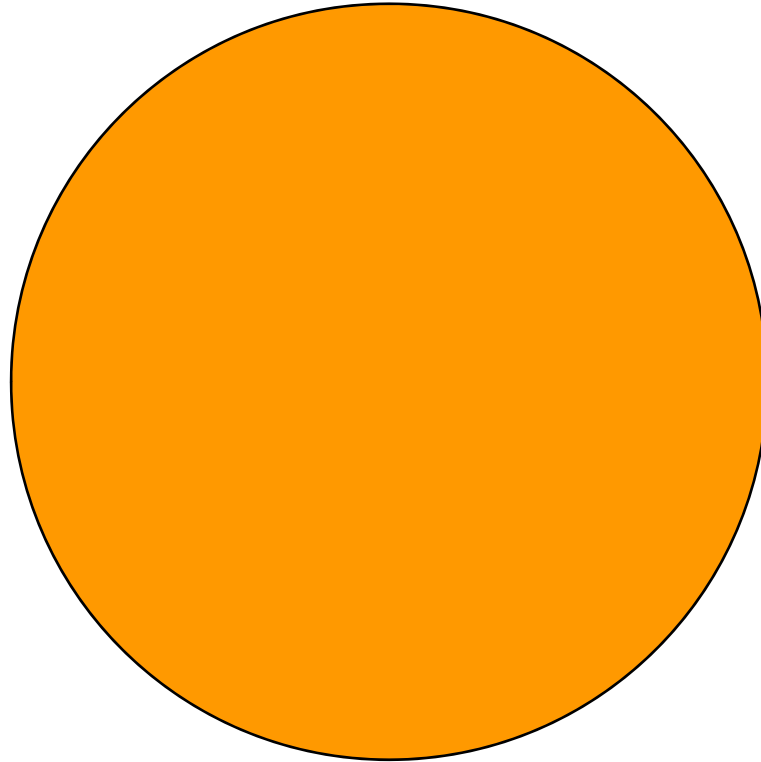
種類



これらの原子核の色々な性質を研究するのが
原子核物理学

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？

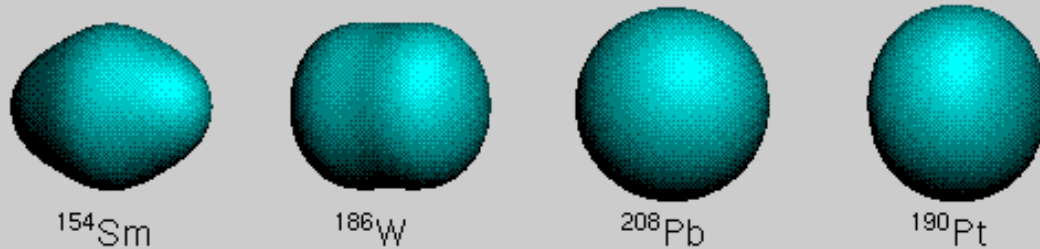


原子核はまん丸？

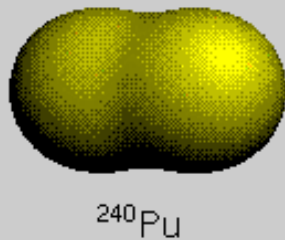
原子核物理学で研究していることの例

➤原子核はどのような形をしているの？

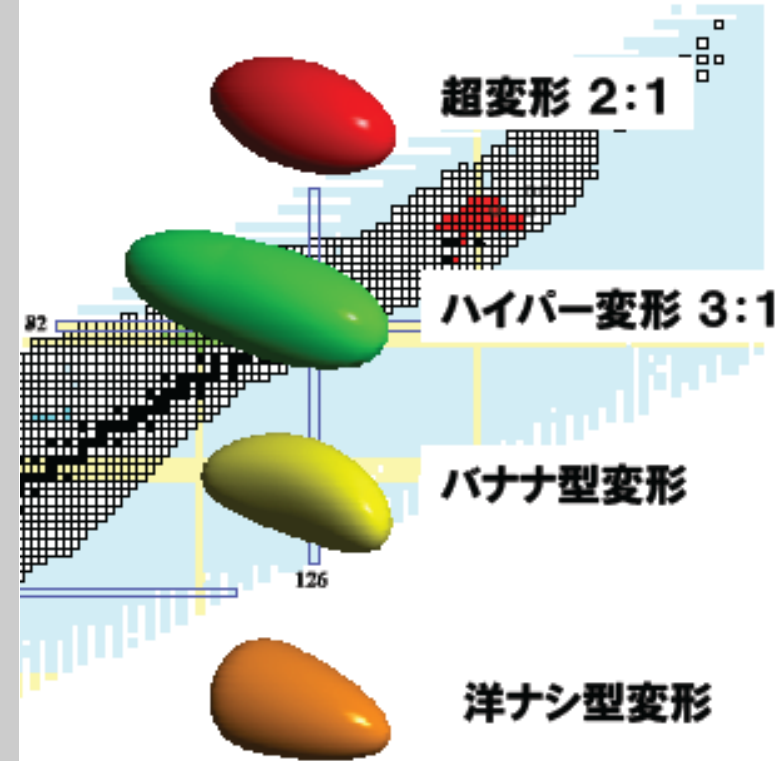
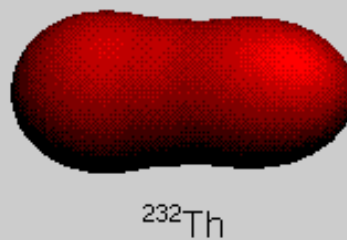
Nuclear ground-state shapes



Isomeric shape



Mass-asymmetric saddle-point shape



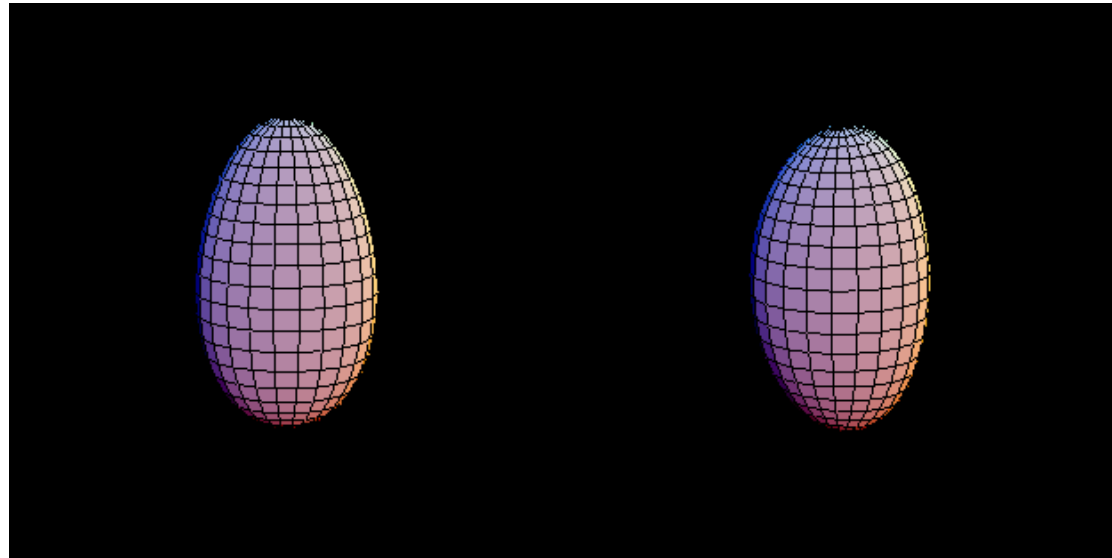
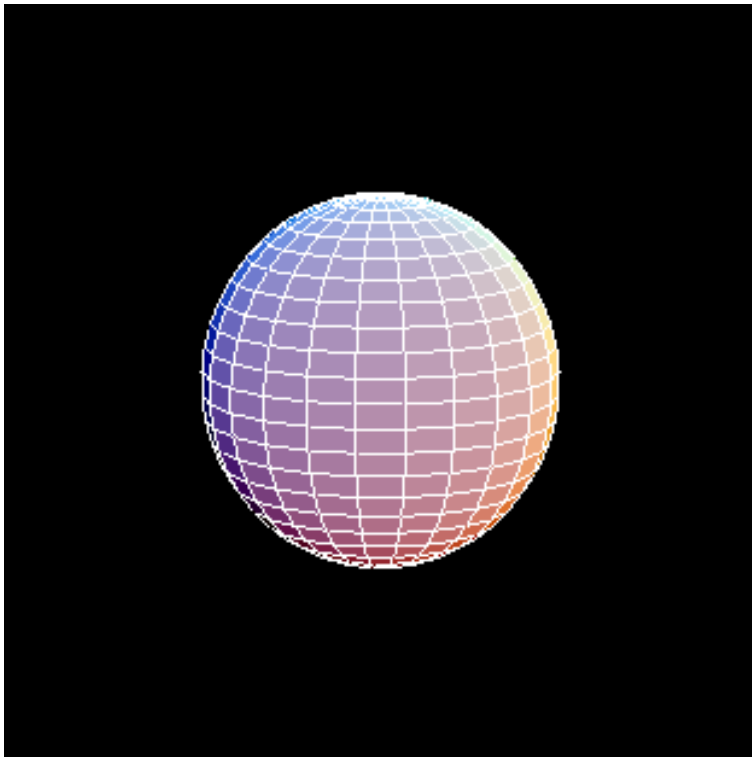
<http://t2.lanl.gov/tour/sch001.html>

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。。。。



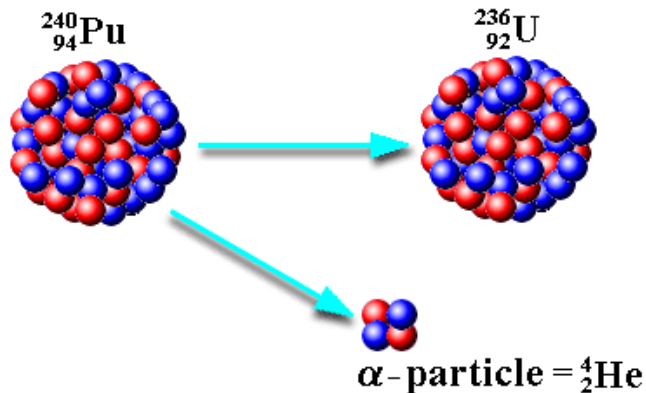
原子核が運動（振動）をはじめる

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)

● α 崩壊(陽子が多い原子核)



● β 崩壊(中性子や陽子が多い原子核)

● この他にも核分裂も。

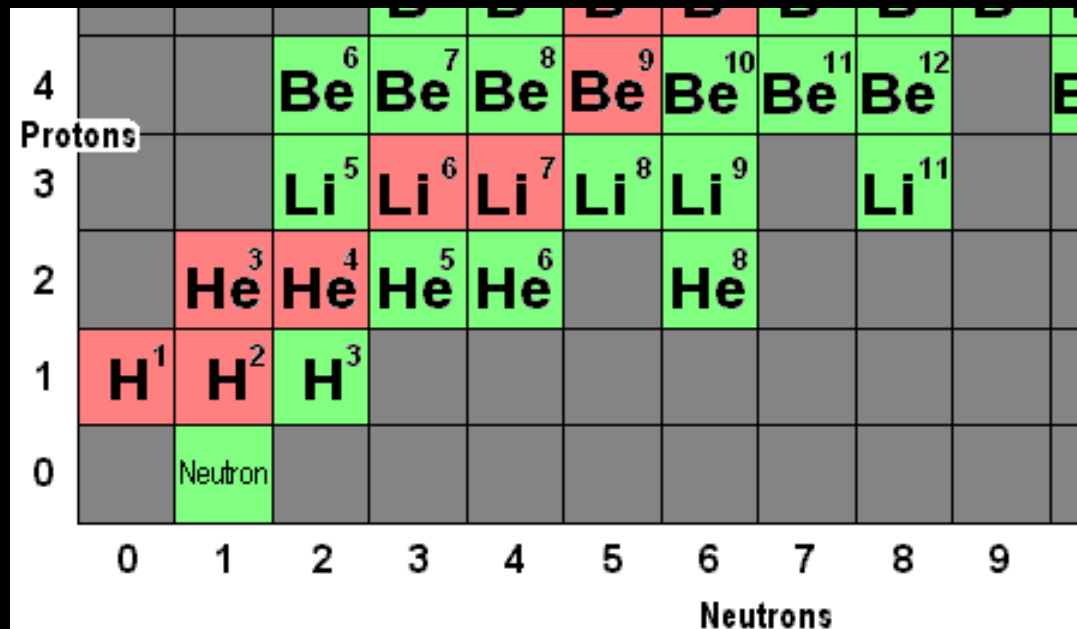
また、 β 崩壊の後に核分裂や γ 崩壊が起こることもある。

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

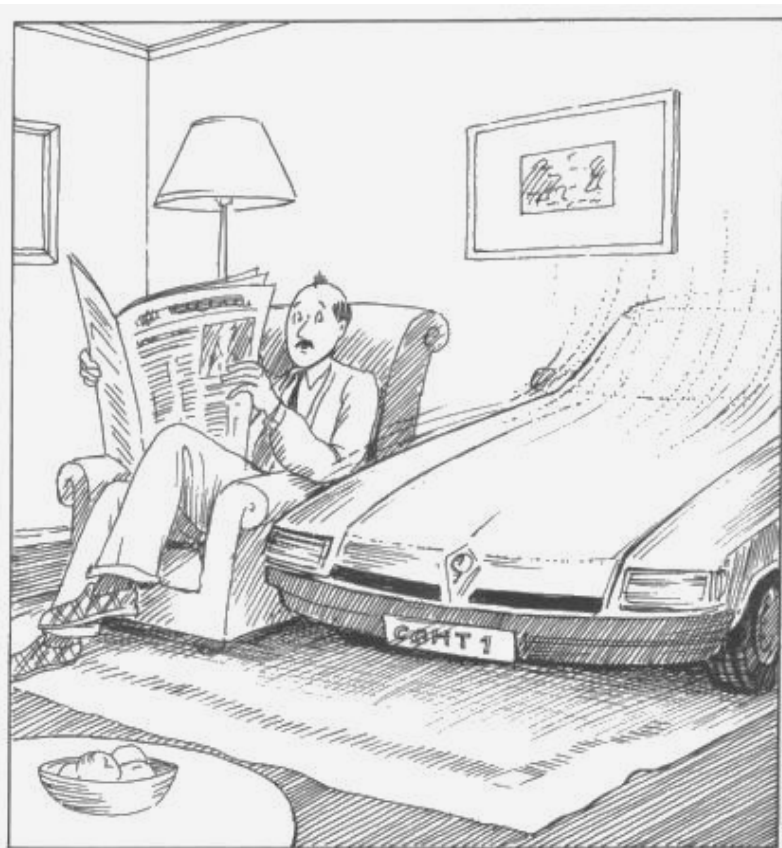
ハイゼンベルクの不確定性原理

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

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

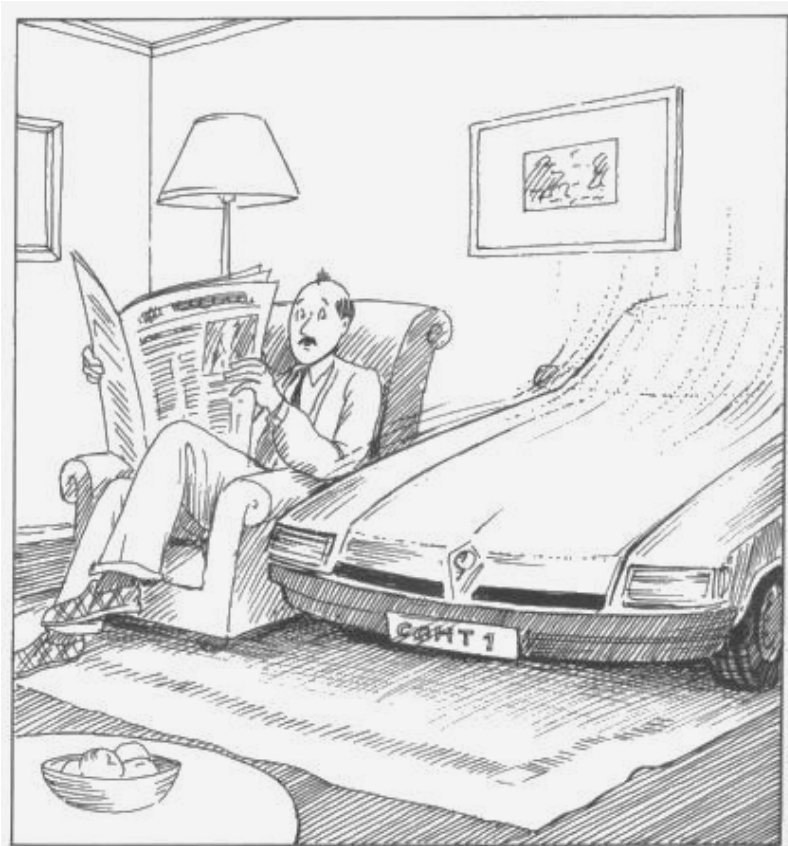
$$\Delta p \cdot \Delta x \geq 10^{-34} \quad \text{J s}$$

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!?



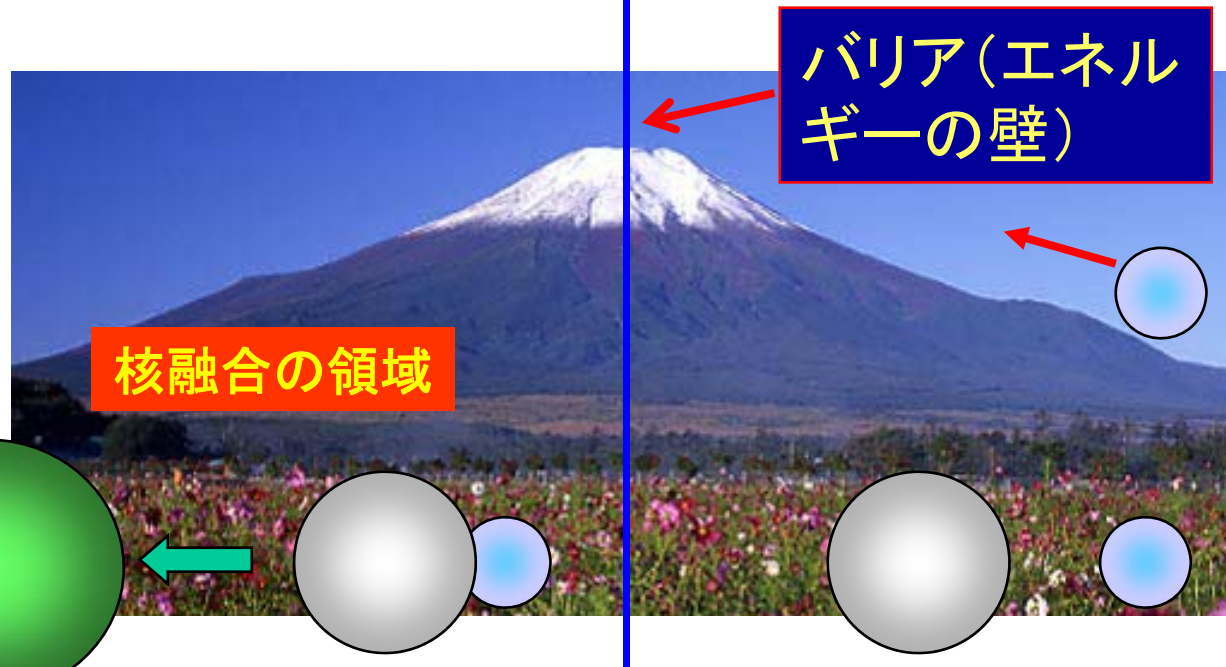
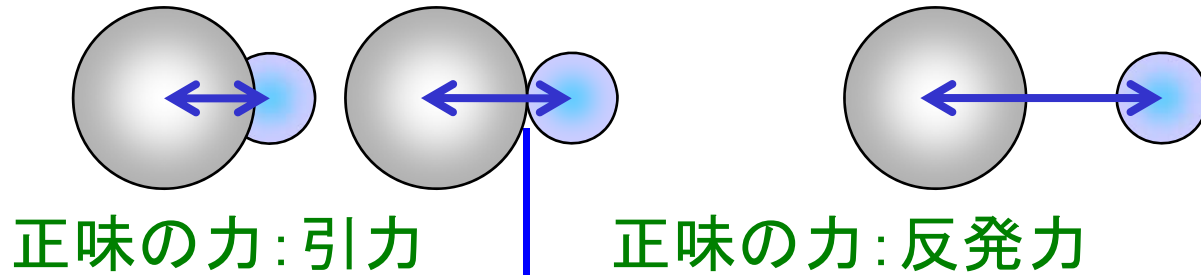
現実では電子や原子核のように質量が軽い場合のみトンネル現象が起きる

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

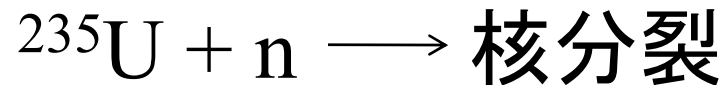
工学・農学・医学への応用

社会における原子核

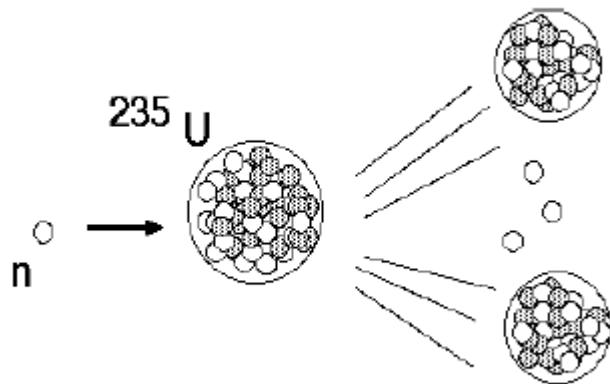
➤ 核エネルギーの利用（原子力発電）

日本の発電電力
の約30%

$$E = mc^2 \text{（質量自体がエネルギー）}$$



核分裂の後に全質量が小さくなれば、核分裂の前後の質量の差がエネルギーになる（約 202 MeV）



福島第一原発

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M₂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

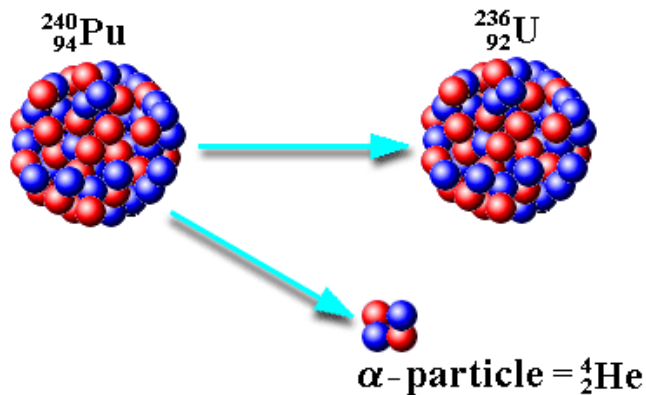
- 三味線の糸の強化
- 年代測定

放射線とは

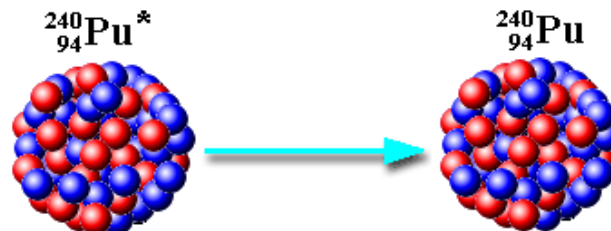
原子核の崩壊現象に伴って放出される
粒子・電磁波

α 崩壊(陽子が多い原子核)

γ 崩壊(原子核の励起状態)



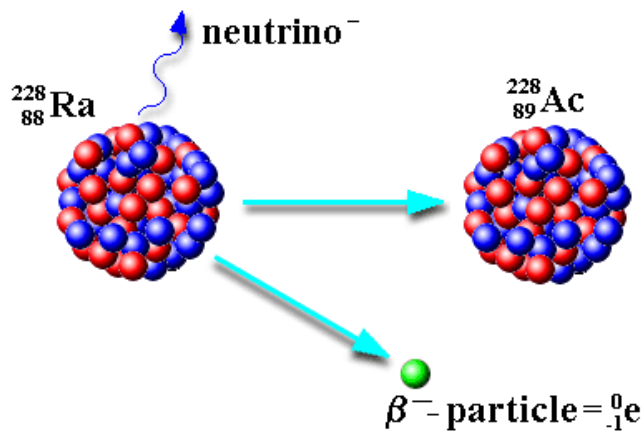
α 線(^4He 原子核)



γ -radiation: high-energy
electromagnetic waves

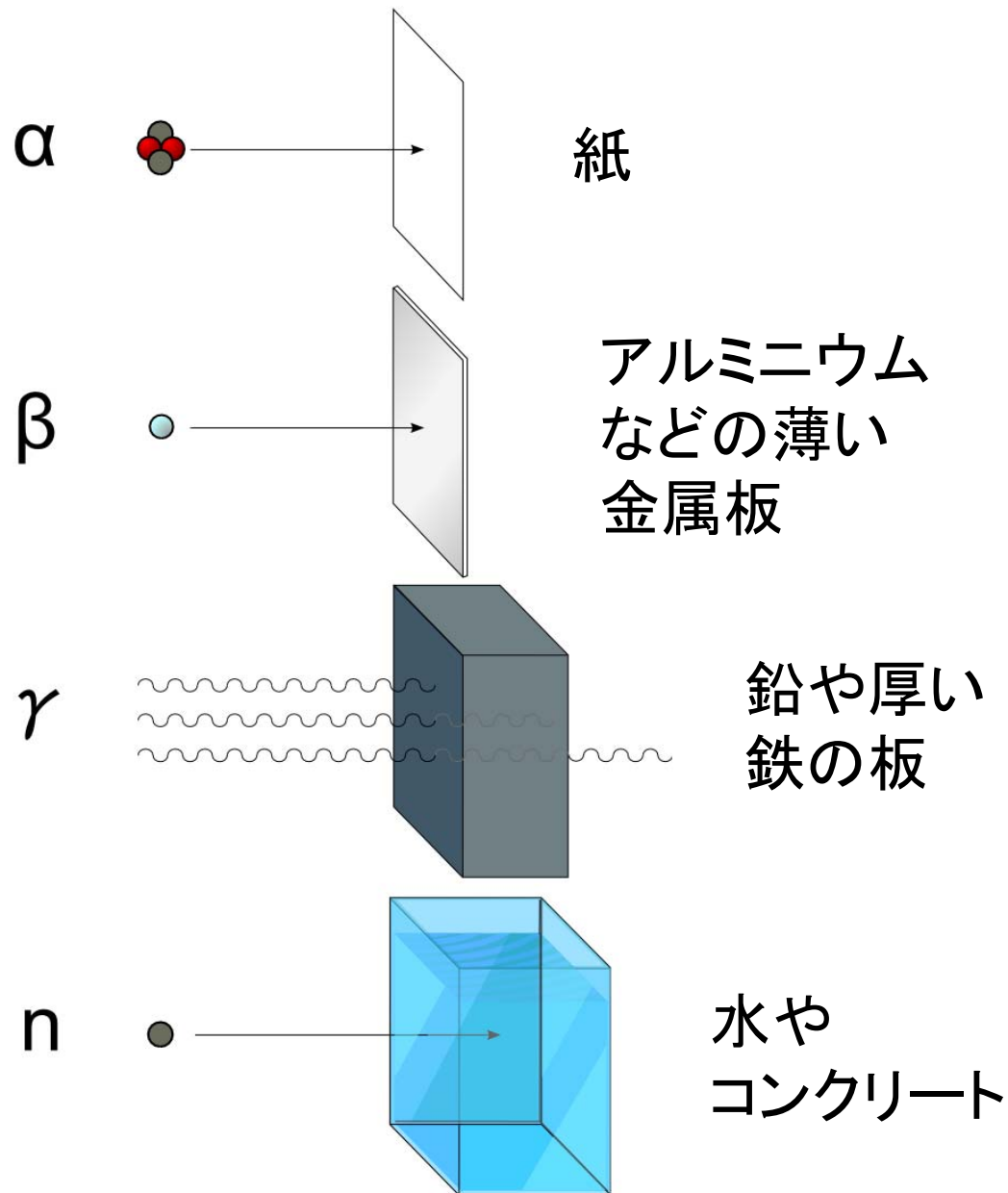
γ 線(高エネルギー
電磁波)

β 崩壊(中性子が多い原子核)



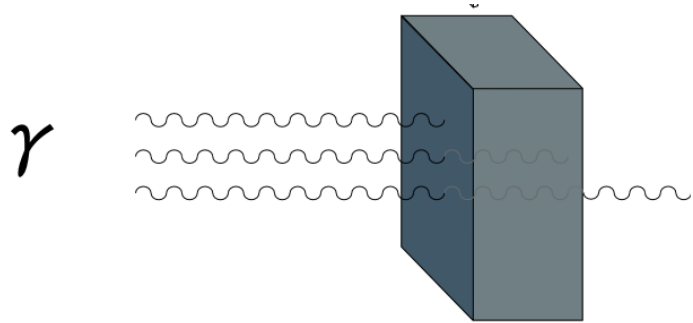
β 線(電子)

放射線の透過能力



放射線の工業的応用

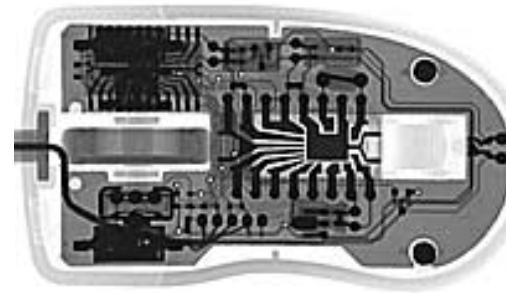
放射線の透過能力 → 工学的応用に重要



γ線やX線は物体を容易に透過する性質を持つ



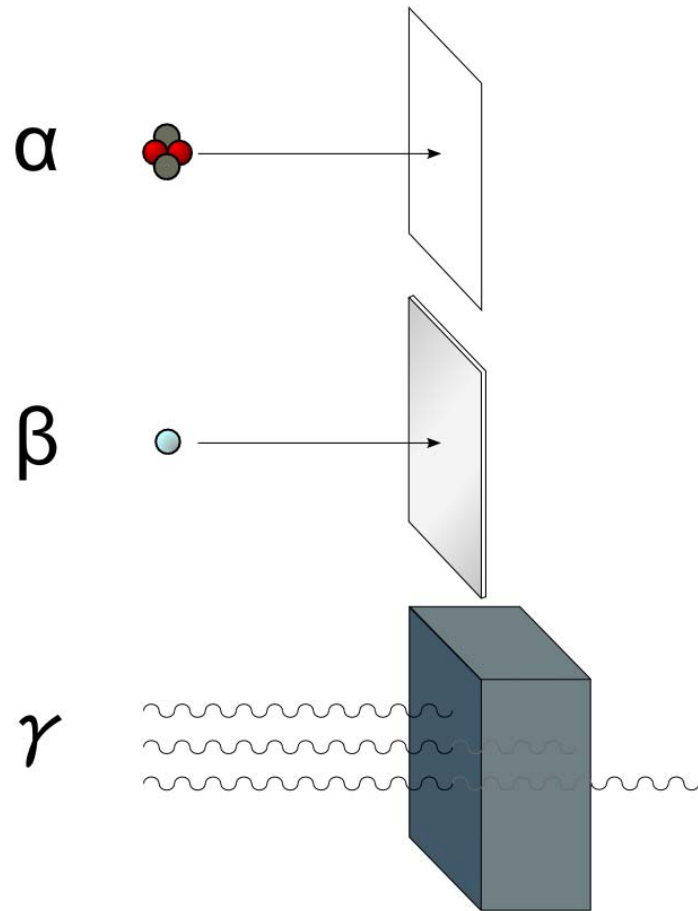
X線



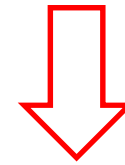
http://www.enepa.ne.jp/radio/radio_16.html

- 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
 β 線や γ 線の量
 α 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 γ 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

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

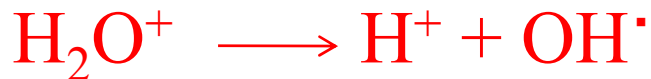


(人体の80%は水)

+



H_2O^+ , H_2O^- 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（ γ 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(γ 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

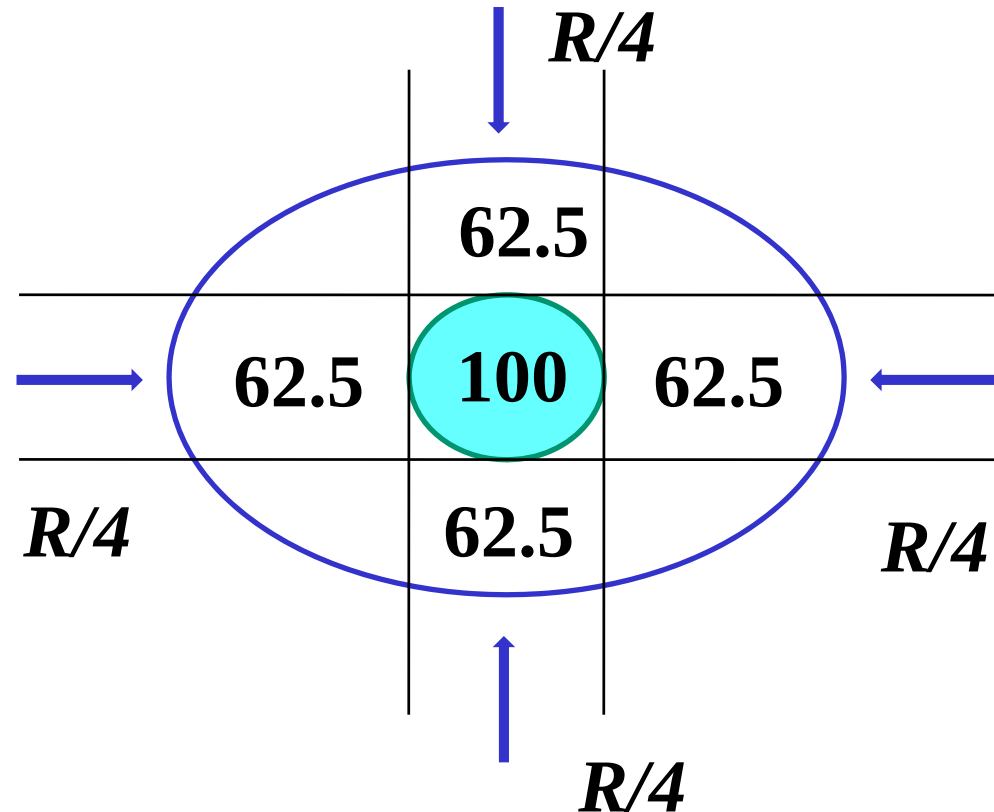
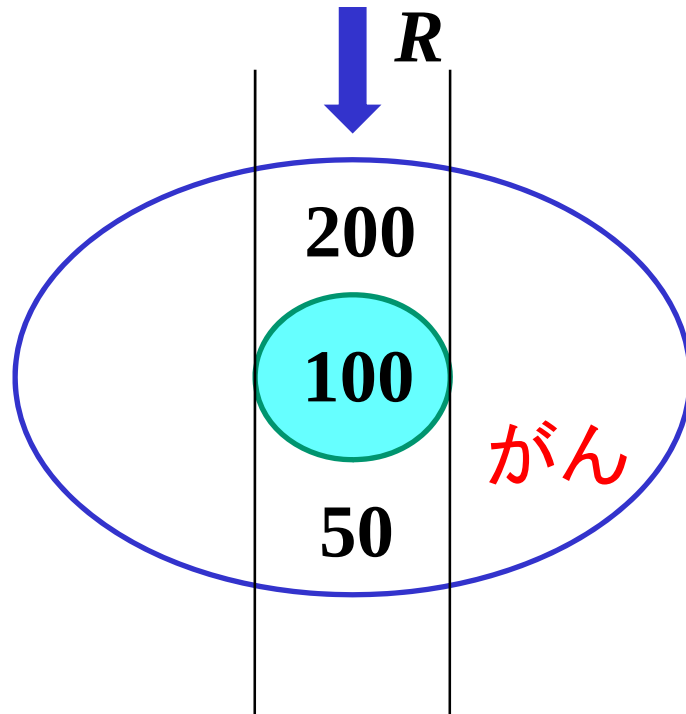
- 複数の方向から放射線を照射する
- 弱い放射線を繰り返し何回か照射する

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

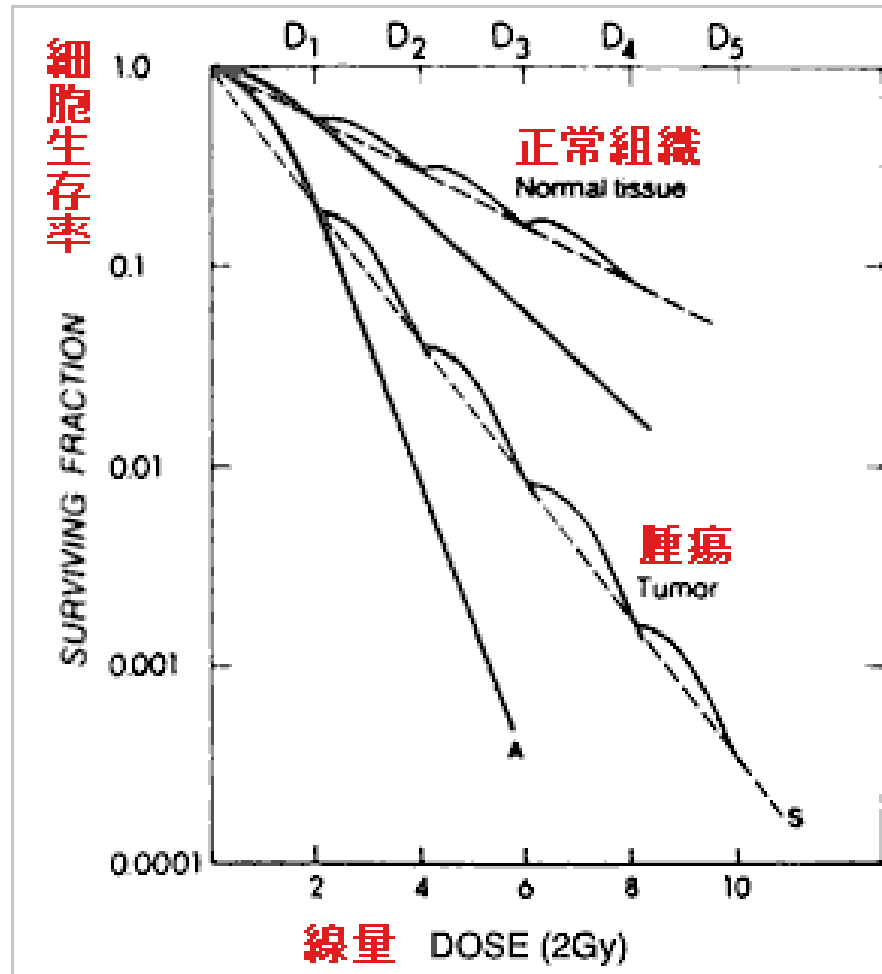
- 複数の方向から放射線を照射する



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

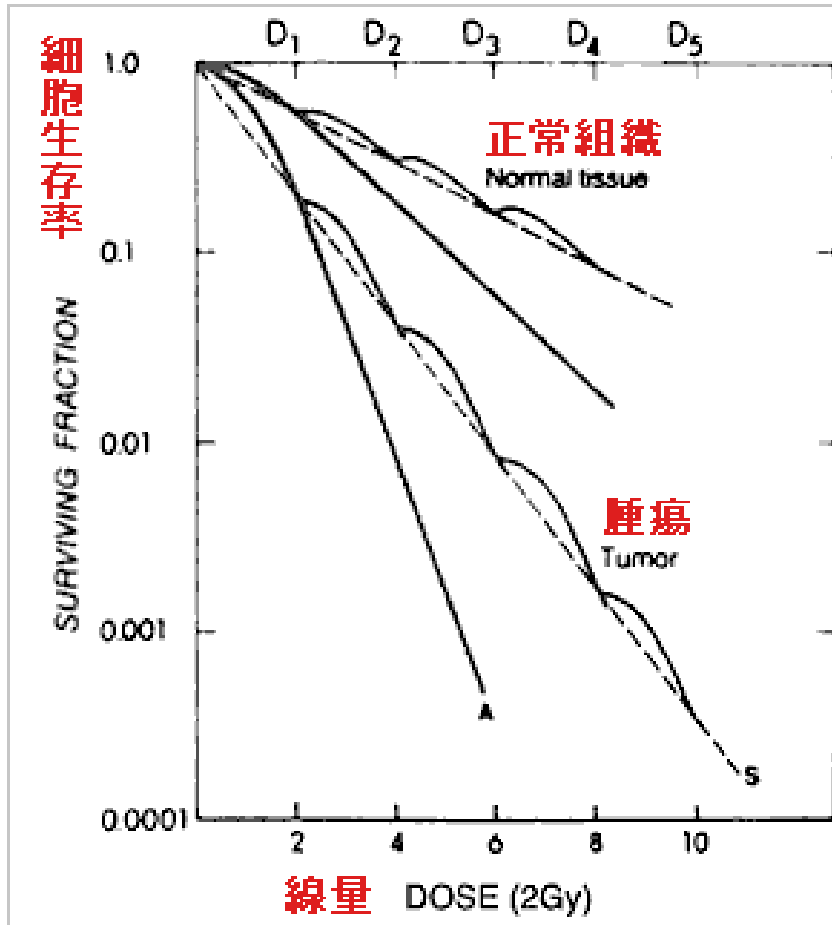


➤細胞は放射線で壊されても回復する能力がある

➤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、正常細胞の回復を図り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

がん:細胞分裂の暴走(細胞分裂が盛ん)

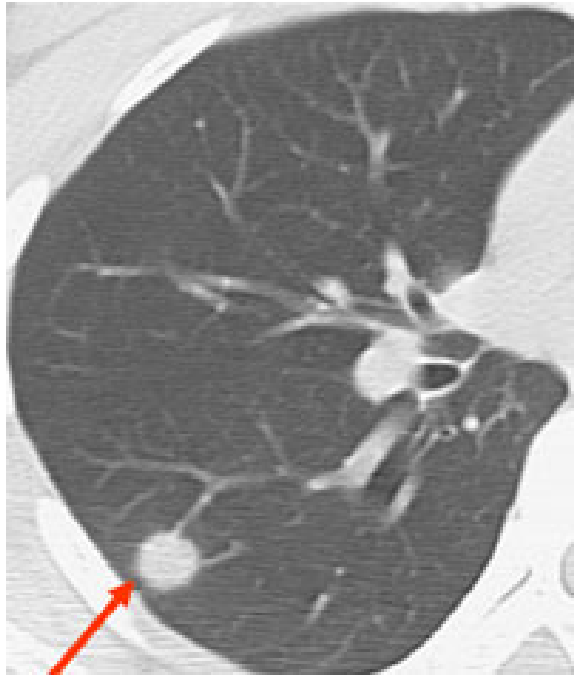
➡ 細胞分裂の間は細胞は不安定

➡ 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)

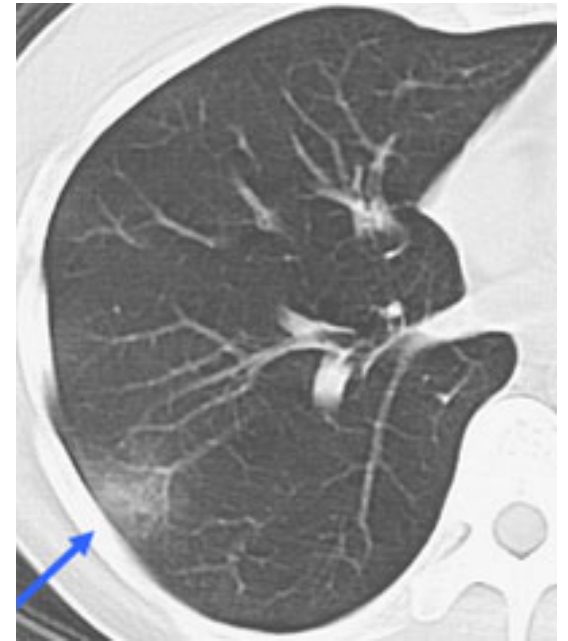
http://www.hosp.tohoku.ac.jp/cc/gan_qa/gan_01.html



肺がんのCT画像
(治療前)



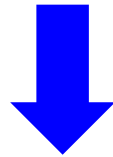
放射線の線量分布
(治療計画)



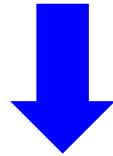
治療後のCT画像

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)



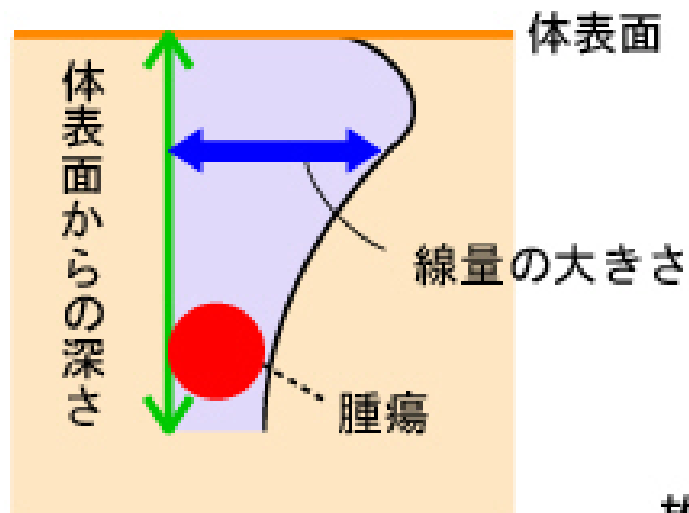
がん治療に十分な放射線量を目的の部分に照射することができない



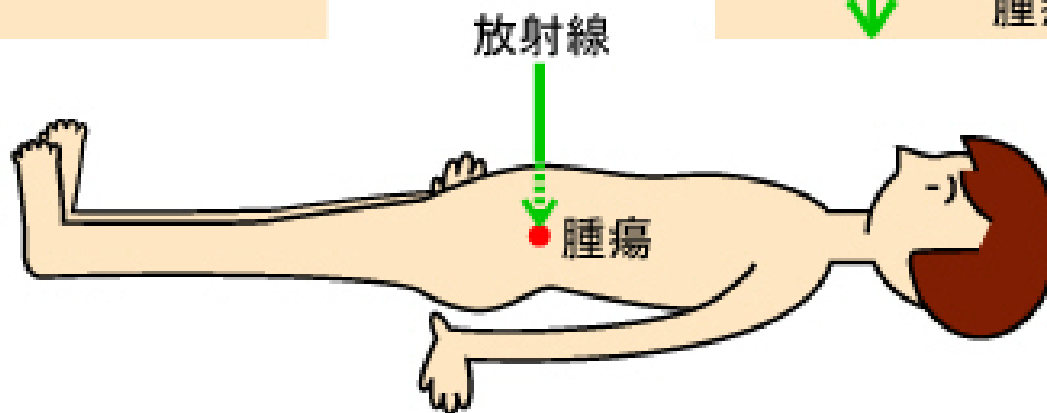
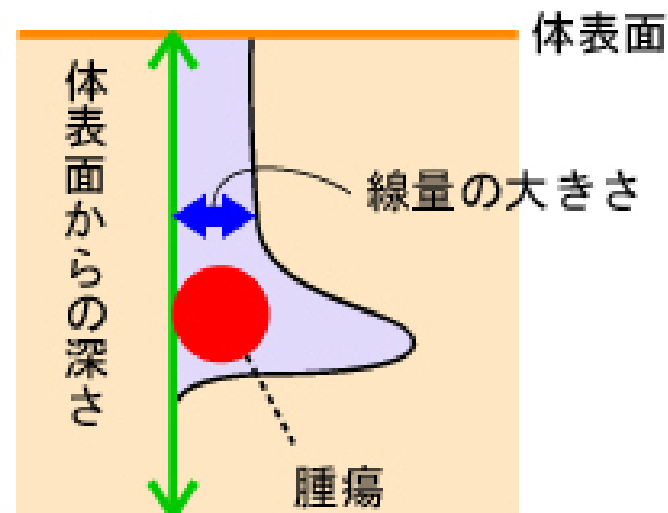
粒子線(陽子線、炭素線)による治療

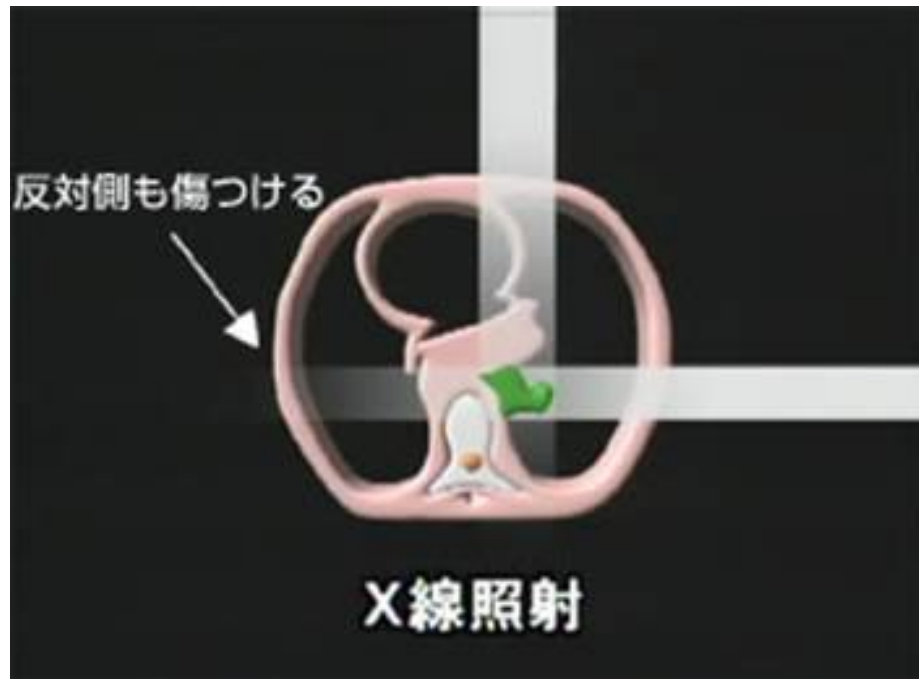
粒子線の特徴

エックス線・ガンマ線



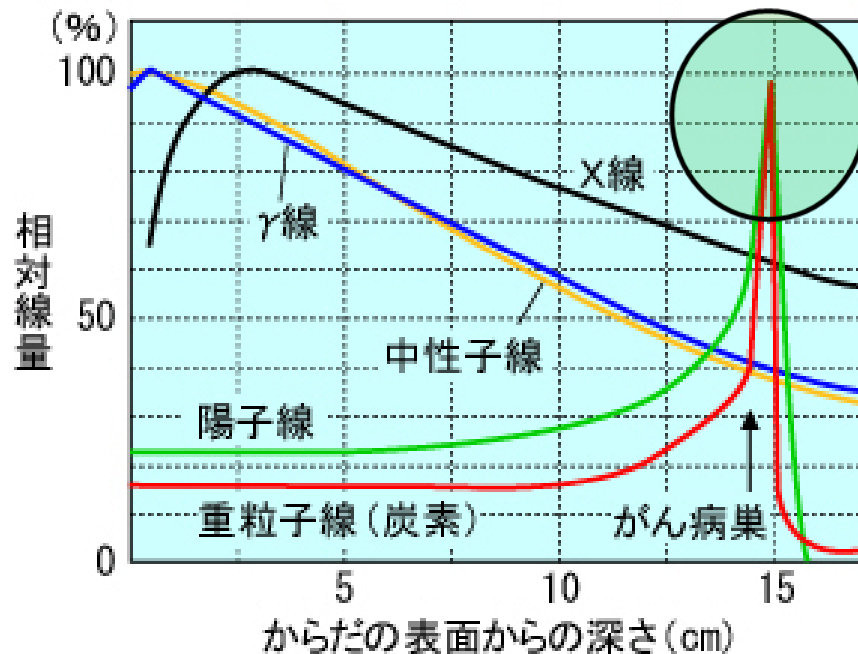
陽子線・重粒子線





<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により、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

粒子線治療施設 宮城県がんセンターに開設へ

がんの最先端医療「粒子線治療」の施設の設立計画を進めている東北大学医学部グループは、名取市の宮城県立がんセンターに「東北粒子線がん治療センター(仮称)」を2009年度にも開設する方針を固めた。粒子線治療は放射線治療より副作用が少ない。経営は特定目的会社(SPC)、医療行為は医療法人が行い、経営リスクの分散を図る。同種施設は千葉市など全国6カ所にあるが、SPCの運営は初めて。

(河北新報2007年11月3日)

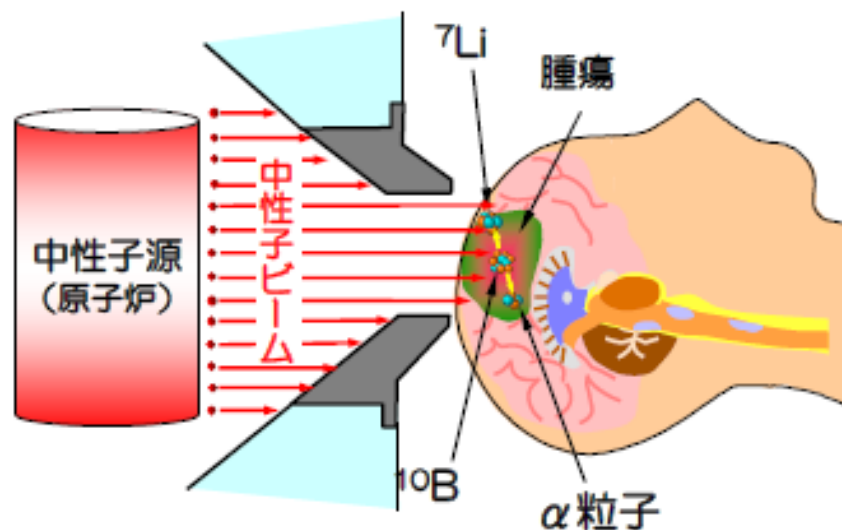


ホウ素中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy)

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}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 α 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***

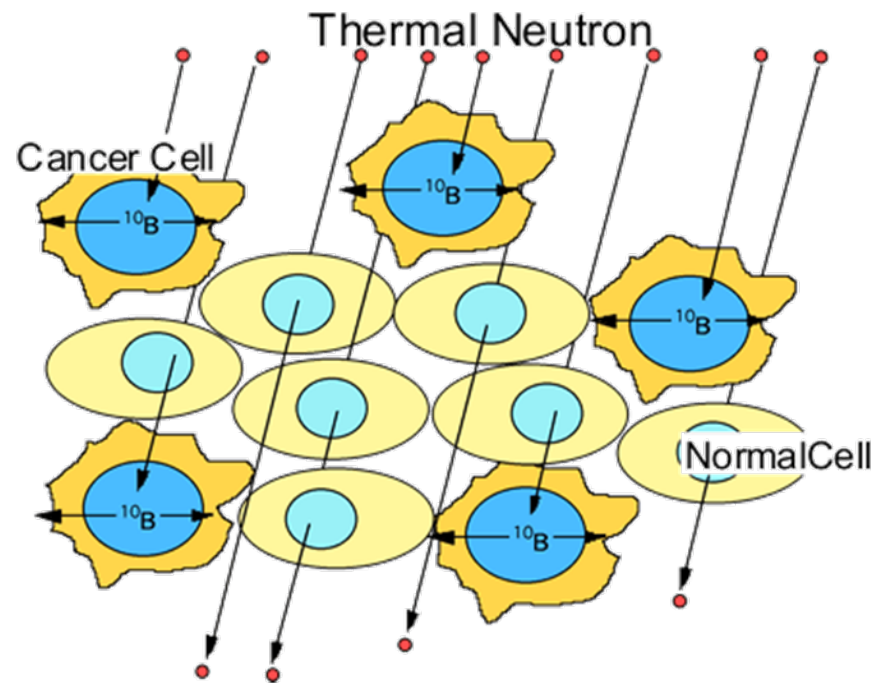
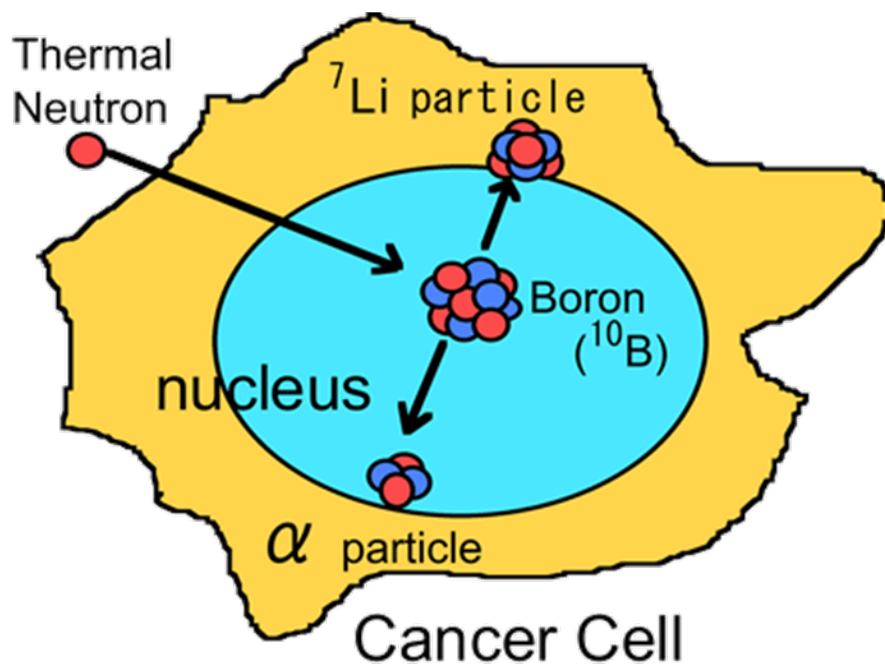
*** BNCTは腫瘍細胞のみを選択的に破壊することができるため、周囲の健全な組織にダメージを与えることなくがんを治療できるため、治療後のQOLが良い。

* 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用いられているホウ素化合物は、 ^{10}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}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 α 粒子を放出する。このとき α 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: $5\ \mu\text{m}$ (^7Li), $9\ \mu\text{m}$ (^4He)

➡ 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)。

