

# 放射線と放射性同位体の基礎

東京大学大学院 農学生命科学研究科  
放射性同位元素施設/放射線植物生理学研究室

廣瀬 農

# 第2回・第3回の講義で何が身につくか？

例えば、以下の問題に答えられるようになります。



Q:

このコップ1杯の牛乳に、放射性核種である $^{137}\text{Cs}$ が100Bq含まれているとする。

この1杯を飲むことによる被ばくリスクはどの程度か？

# 第2回・第3回の講義で何が身につくか？

例えば、以下の問題に答えられるようになります。



Q:

今日の講義では、放射性核種の性質や、Bqという単位について学びます。

このコップ1杯の牛乳に、放射性核種である $^{137}\text{Cs}$ が100Bq含まれているとする。

この1杯を飲むことによる被ばくリスクはどの程度か？

次回の講義では、放射線が人体に影響するメカニズムや、被ばくリスクを表す単位であるSvについて学びます。

# 本日の講義内容

## 放射線と放射性同位体の基礎

放射線の基本

放射線と物質の相互作用

荷電粒子の放射線

非荷電粒子の放射線

放射線の発生源

放射線の可視化

シミュレーション

霧箱

放射性同位体とは？

Bqという単位

半減期

放射性核種はなぜ不安定？

$\beta$ 壊変

$\alpha$ 壊変

放射線へのエネルギー分配

$\gamma$ 線スペクトル解析

放射性同位体の生成

# 放射線の基礎

# 放射線の基本

- 1) 原子よりも小さい何らかの粒子が…
- 2) 通常の数千倍以上のエネルギーを持って運動している場合
- 3) 放射線としての性質を示す

# 1) 原子よりも小さい何らかの粒子が...

「原子よりも小さい粒子」の例

原子核

陽子、中性子

電子、陽電子、 $\mu$ 粒子

光子

2) 通常の数千倍以上のエネルギーを持って  
運動している場合

---

	粒子	エネルギー
可視光線	光子	2~3 eV
$^{137}\text{Cs}$ の $\gamma$ 線	光子	662 keV

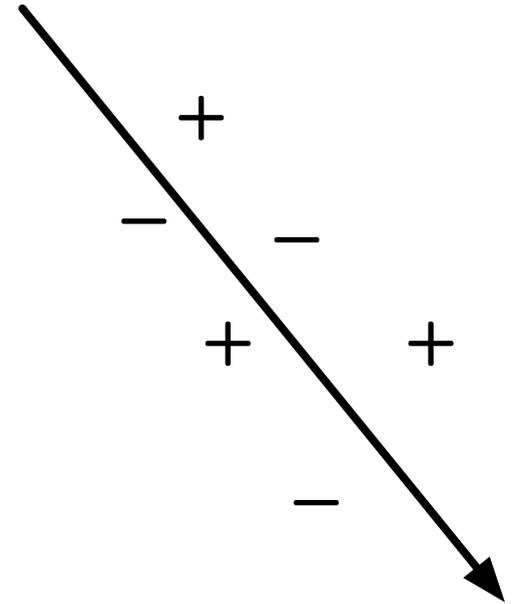
粒子は同じ

エネルギーは20~30万倍

### 3) 放射線としての性質を示す

放射線が物質を通過すると、強制的な電離  
(=イオン化) が起こる。

この性質が人体影響を考慮する際、あるいは放射線を測定する際に重要。

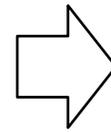


# 放射線の基本

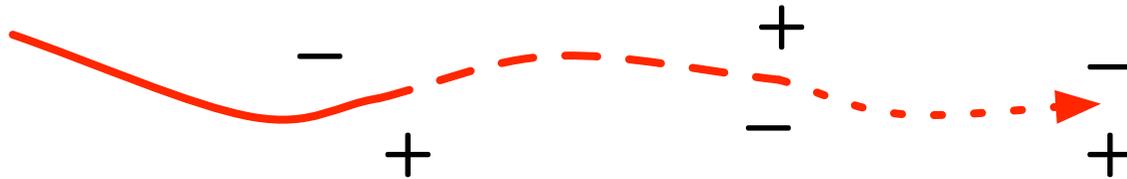
- 1) 原子よりも小さい何らかの粒子が…
- 2) 通常の数千倍以上のエネルギーを持って運動している場合
- 3) 放射線としての性質を示す

# 放射線と物質の相互作用（荷電粒子）

粒子に電荷が有る場合は、経路に沿って直接的に電離を起こす。



Heの原子核、陽子、電子など

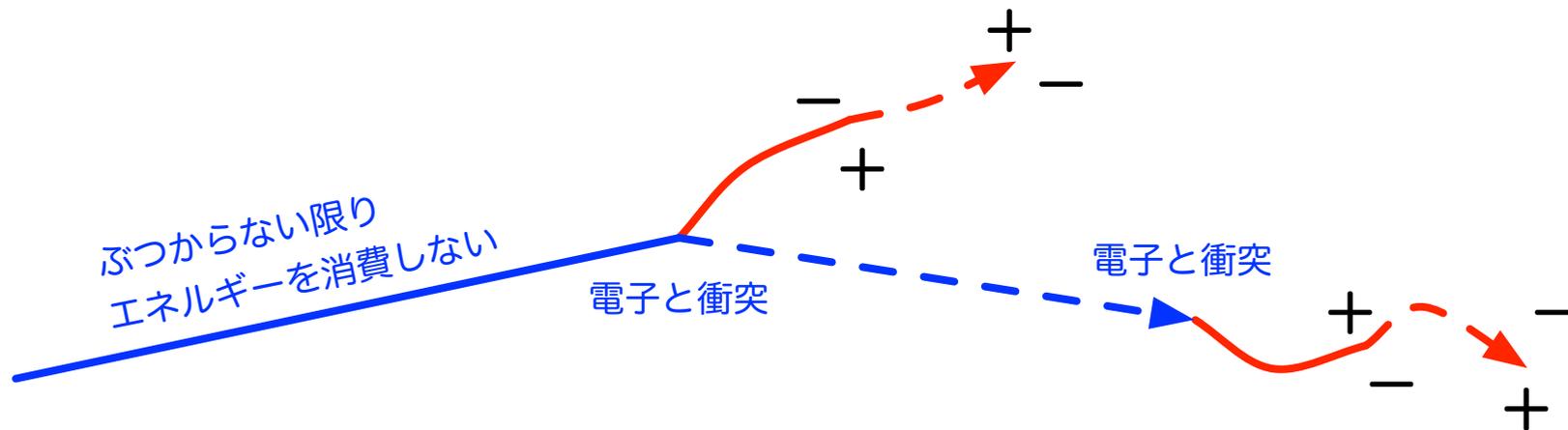


物質を電離することで、放射線の運動エネルギーが消費され、最終的には放射線としての性質を失う。

# 放射線と物質の相互作用（非荷電粒子）

粒子に電荷が無い場合、物質中で電荷を持つ粒子（電子や陽子）をはじき飛ばし、はじき飛ばされた粒子が電離を起こす。

⇒ 光子、中性子など



別の粒子をはじき飛ばすことで、放射線の運動エネルギーが消費され、最終的には放射線としての性質を失う。

# 放射線と物質の相互作用 まとめ

粒子に電荷が有る場合は、経路に沿って直接的に電離を起こす。

粒子に電荷が無い場合、物質中で電荷を持つ粒子（電子や陽子）をはじき飛ばし、はじき飛ばされた粒子が電離を起こす。



直接・間接的に電離を起こすことで放射線の運動エネルギーが消費され、最終的には放射線としての性質を失う。

# 放射線の主な発生源

放射性物質 (RI)

詳しい発生メカニズムはこの後説明。  
 $^{40}\text{K}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{238}\text{U}$ 等は天然に存在。

加速器

粒子自体を加速して放射線にするか、  
加速した粒子のエネルギーを使うことで  
放射線を発生させる。

原子炉

中性子線源として利用できる。

宇宙線

宇宙からは多様な放射線が飛来する。  
地上まで届くのは二次的な線が大部分。

# 放射線の挙動を可視化する

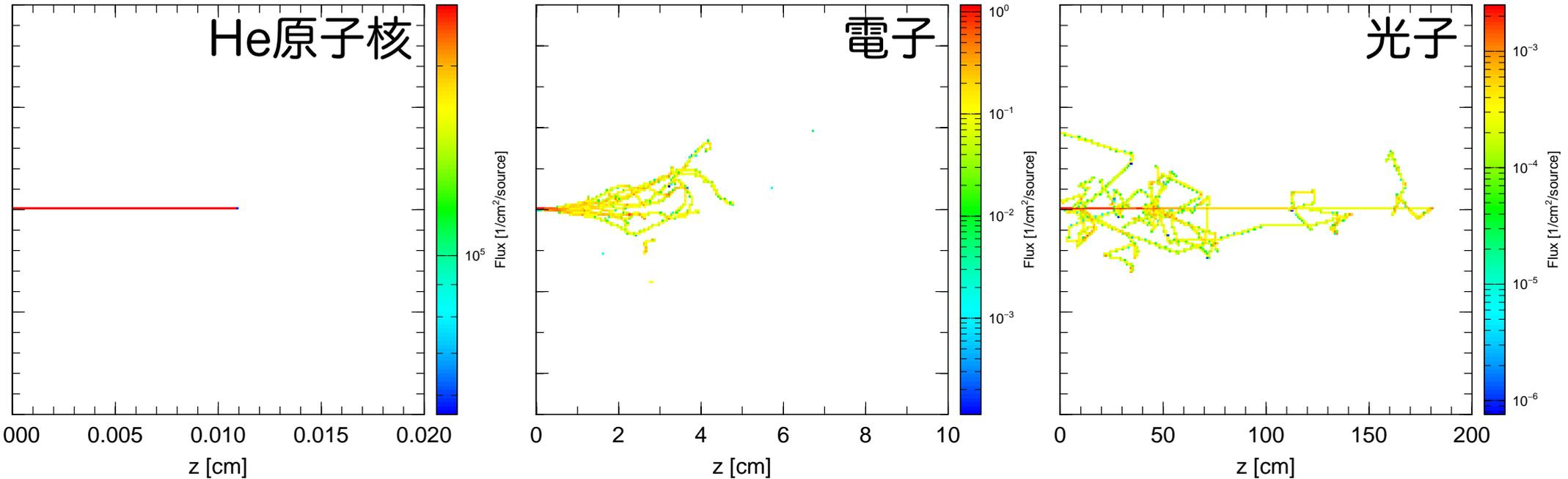
## 方法その1：シミュレーション

放射線は目に見えないが、放射線の物質中での挙動をコンピュータシミュレーションで可視化することはできる。

ここから3枚のスライドでは、一般的な放射線の挙動をPHITSというソフトウェアで可視化した例を示す。

# PHITSによる放射線挙動シミュレーション

## 1) 粒子による飛跡の違い

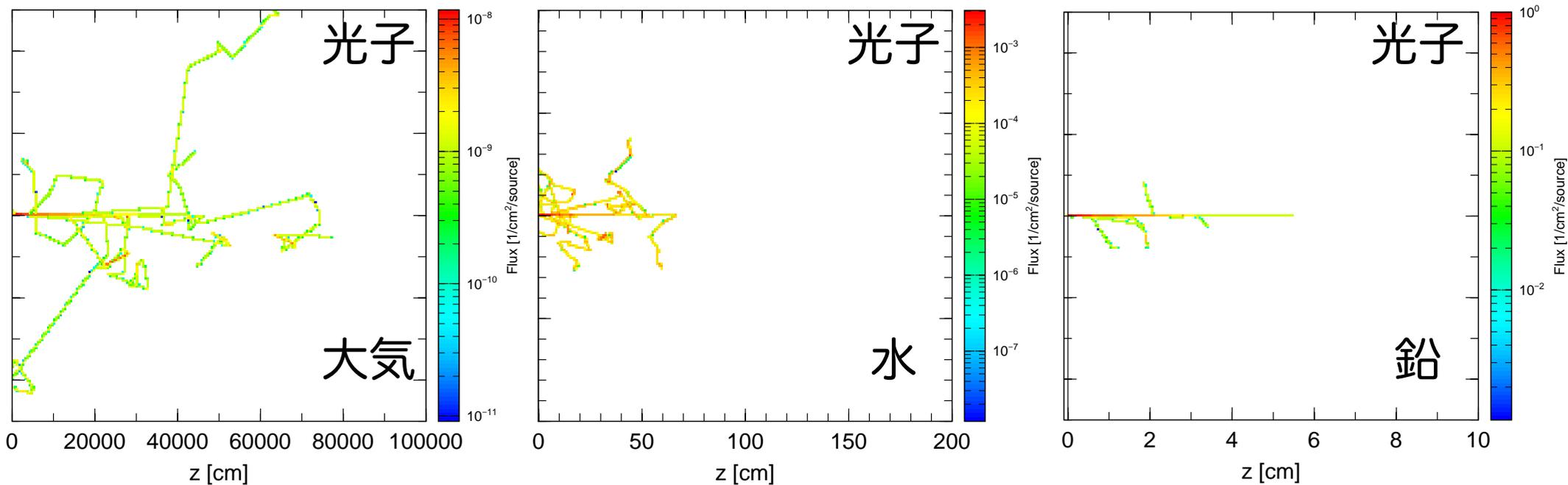


10MeVの運動エネルギーを持つ放射線の水中での挙動を、10回シミュレーションした際の飛跡。

同じ運動エネルギーでも、粒子によって飛距離は大きく異なる。Heの原子核は飛程は短い、狭い範囲に集中してエネルギーを与える。逆に光子線は広い範囲に少しずつエネルギーを与える。

# PHITSによる放射線挙動シミュレーション

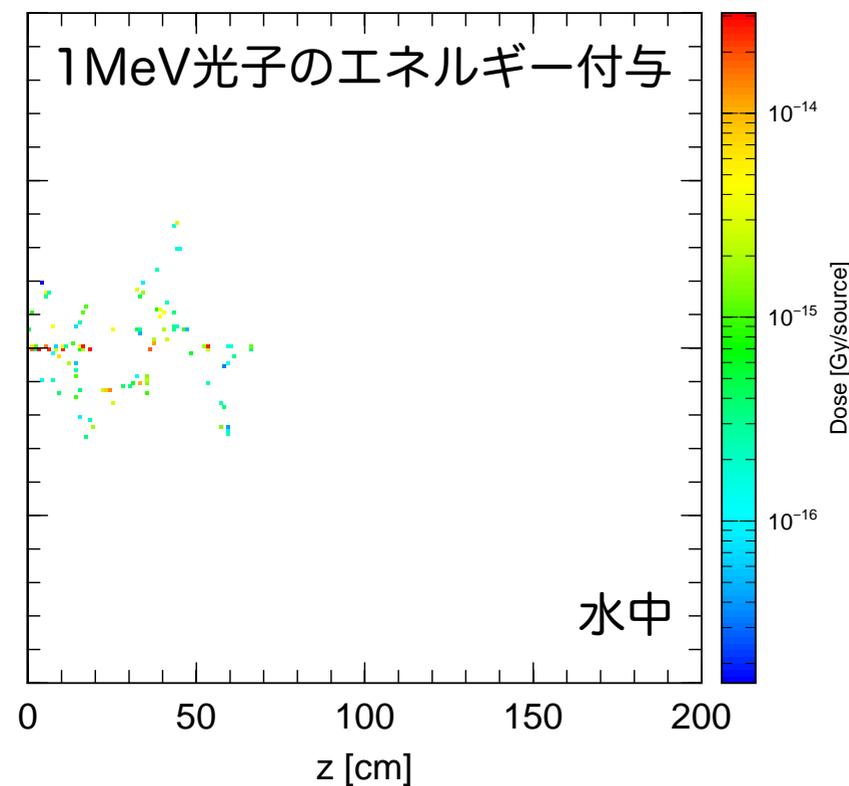
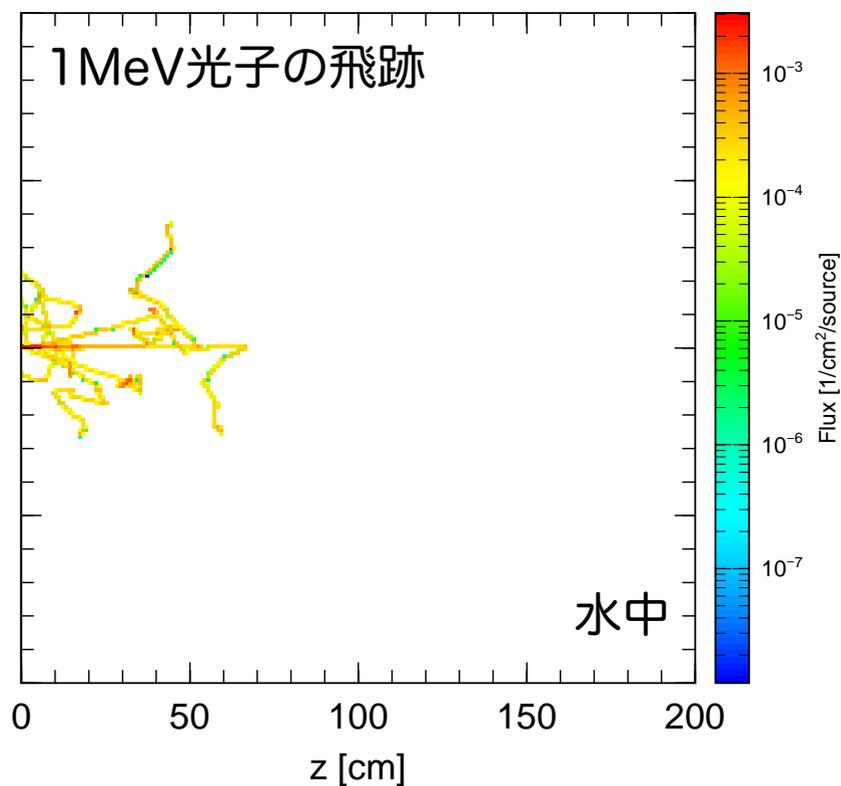
## 2) 物質による飛跡の違い



異なる物質中での1MeVの光子線の飛跡。

同じ粒子・同じ運動エネルギーの放射線でも、通過する物質によって飛距離は異なる。

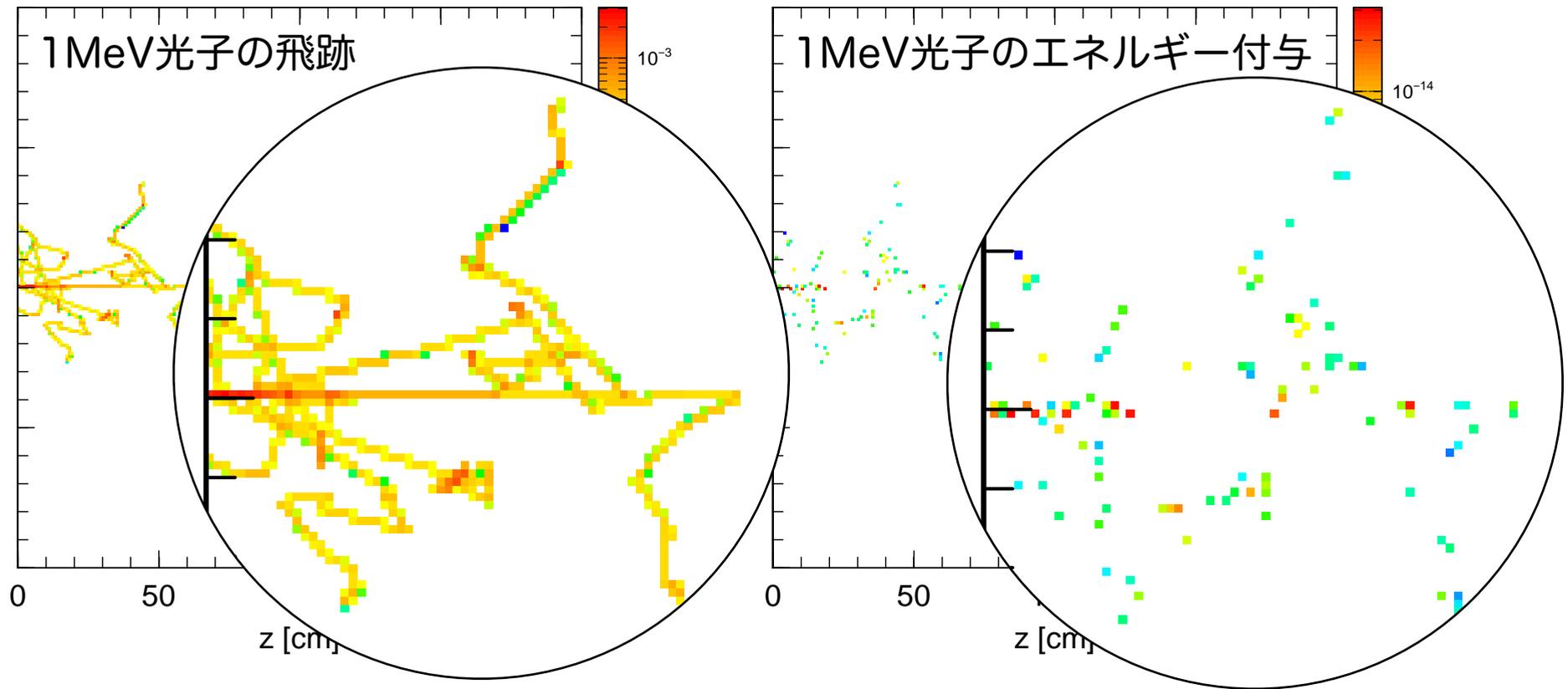
## 3) 光子によるエネルギー付与パターン



光子線は飛跡そのものにはエネルギーを付与せず、光子線で弾き出された電子が物質にエネルギーを付与（=イオン生成）する。

このため、光子のエネルギー付与は広範囲に点状（より正確には短い線状）に散らばる。

### 3) 光子によるエネルギー付与パターン



光子線は飛跡そのものにはエネルギーを付与せず、光子線で弾き出された電子が物質にエネルギーを付与（=イオン生成）する。

このため、光子のエネルギー付与は広範囲に点状（より正確には短い線状）に散らばる。

# 放射線の挙動を可視化する

## 方法その2：霧箱

- 1) エタノールの蒸気が過飽和となっている空間で電離が起きると、電離したイオンを凝結核として霧が発生する。
- 2) 粒子に電荷が有る放射線は、経路に沿って直接的に電離を起こす。
- 3) エタノールの蒸気が過飽和となっている空間を、粒子に電荷が有る放射線が通過すると、**放射線の経路に沿って霧が発生する。**

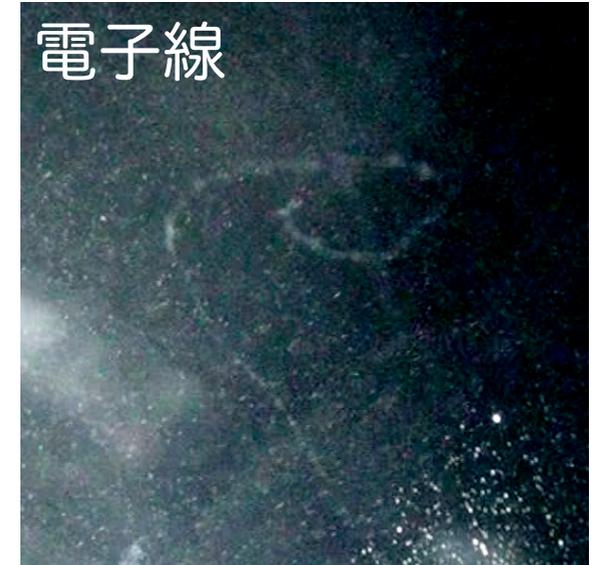
# 放射線の挙動を可視化する

## 方法その2：霧箱

私たちがいるこの教室にも、宇宙線や大地・建造物からの放射線が飛びかっています。電荷を持つ宇宙線であるミューオン（ $\mu$ 粒子）や、大地放射線で弾き出された電子線などを観察できます。

霧箱で自然放射線を観察した際の様子を動画でお見せします。

# ミューオン以外の自然放射線の観察例



上図の飛跡は御影石から捕集したラドン（恐らく $^{222}\text{Rn}$ ）の $\alpha$ 線によるもの。太く直線的な飛跡を示す。

右図の細く曲がりくねった飛跡は電子線によるもの。大地・宇宙からの $\gamma$ 線によって弾き出された電子線か、何らかの天然核種から出た $\beta$ 線が見えている。

# 放射性同位体の基礎

# 放射性同位体とは？

ある原子の原子核が不安定な場合、余分なエネルギーを何らかの粒子に与えて放出し、より安定な状態に変化する。



あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

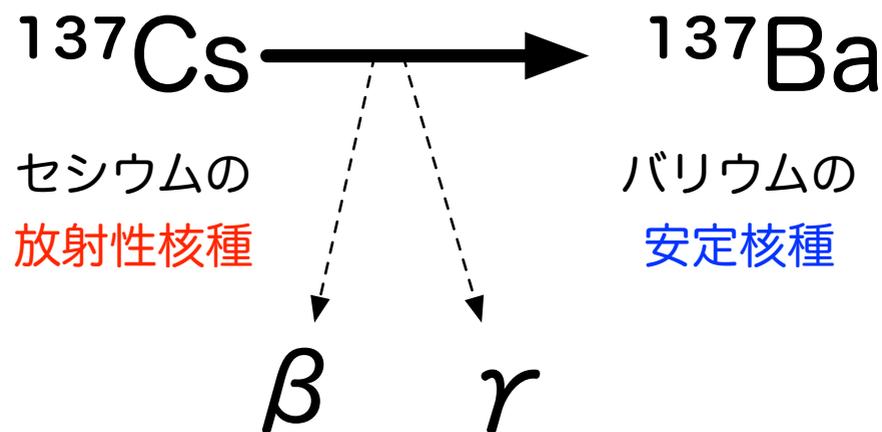
# 放射性同位体とは？

ある原子の原子核が**不安定**な場合、余分なエネルギーを何らかの粒子に与えて放出し、より安定な状態に変化する。

この変化を**壊変**と呼び、壊変する原子核を**放射性核種**（**放射性同位体**）という。エネルギーを与えられた粒子が放射線となる。



あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」



$^{137}\text{Cs}$ の場合、余分なエネルギーは $\beta$ 線および $\gamma$ 線として放出される。  
 $\beta$ 線は電子、 $\gamma$ 線は光子の放射線。

# ベクレル (Bq) とは？

Bqとは、放射性核種の量を1秒当たりの壊変回数で表す単位。

1秒あたり1%の確率で壊変する  
放射性同位体が100個ある場合 ----- 1 Bq

→ 1秒あたり1%の確率で壊変する  
放射性同位体が200個ある場合 ----- 2 Bq

→ 1秒あたり2%の確率で壊変する  
放射性同位体が100個ある場合 ----- 2 Bq

ちなみに、 $^{137}\text{Cs}$ は約13億7千万個の原子が存在すると1Bq。

# Bqについて補足

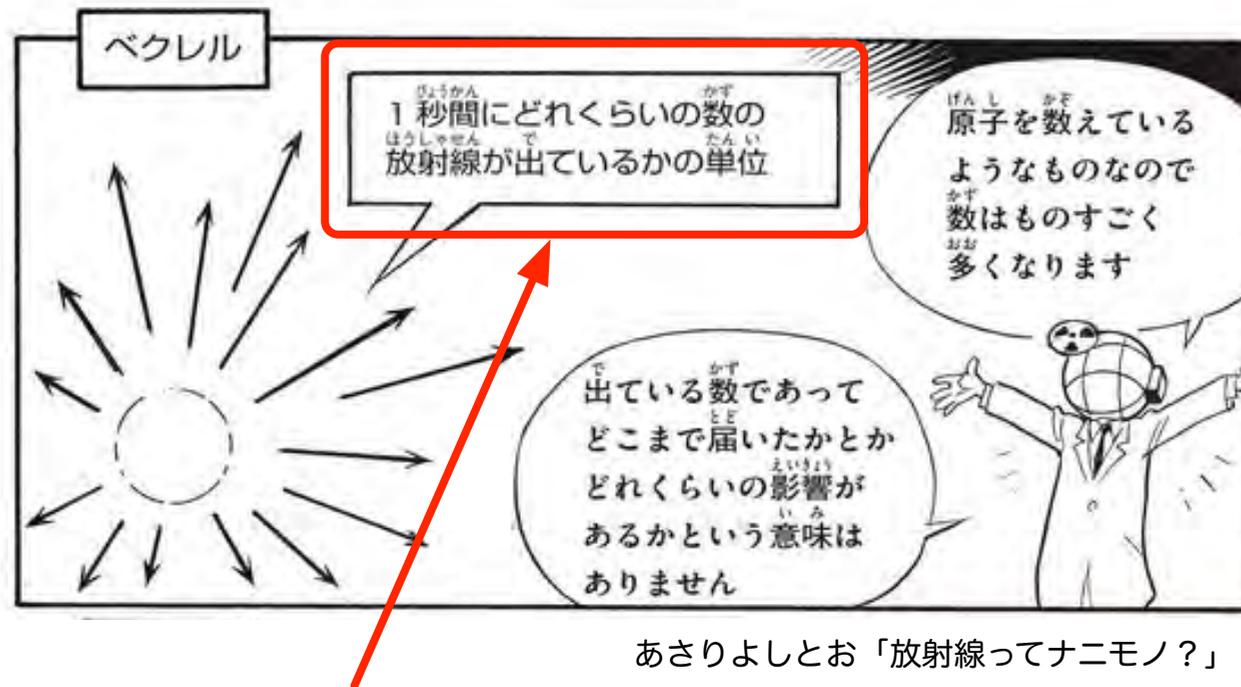
Bqとは、放射性核種の量を1秒当たりの**壊変回数**で表す単位。



あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

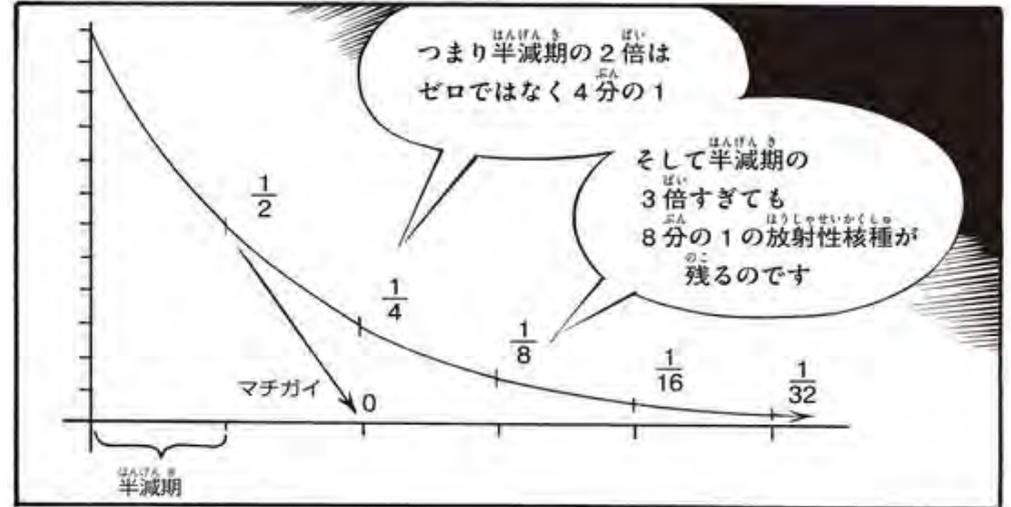
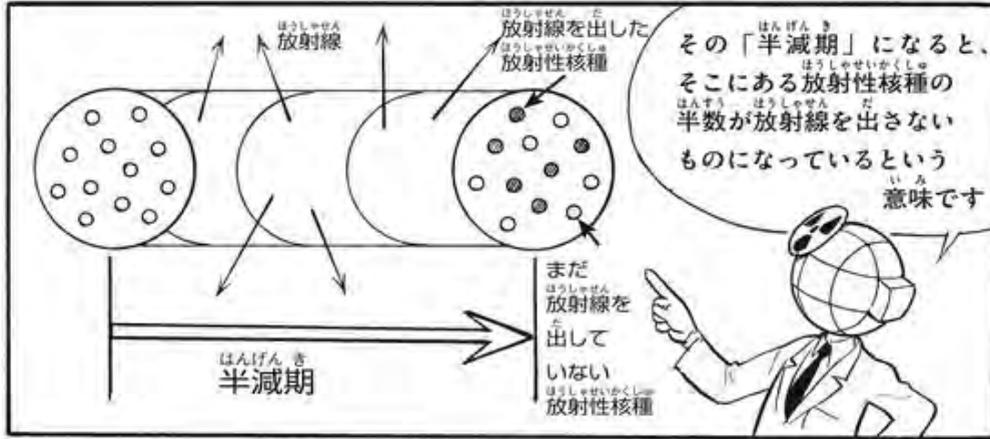
# Bqについて補足

Bqとは、放射性核種の量を1秒当たりの**壊変回数**で表す単位。



1壊変あたり1本の放射線が出る核種ではこの記述で良いが、そうでは無い核種もあることに注意（例えば $^{137}\text{Cs}$ ）。

# 半減期



あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」



$(1/2)^{10} = 1/1024$ なので、  
10半減期で約1/1000と覚えて  
おくと実用上便利。

# 放射性核種の原子核はなぜ不安定？

原子核が安定であるには、1) 陽子と中性子の比が適正である、  
2) 陽子と中性子の合計が大きすぎない、という2つの条件が必要と考えられている。

原発事故で放出された核種の大部分 ( $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ など) は中性子が多すぎる。

このため、中性子が陽子に変わり、余った電子が放出される  $\beta$  壊変によって安定化する。

$\beta$  壊変

中性子  $\rightarrow$  陽子 + 電子

0

+1

-1

# 放射性核種の原子核はなぜ不安定？

原子核が安定であるには、1) 陽子と中性子の比が適正である、  
2) 陽子と中性子の合計が大きすぎない、という2つの条件が必要と考えられている。

例えば、代表的な天然核種である $^{238}\text{U}$ や $^{232}\text{Th}$ は、原子核が大きすぎる（質量数が206より大きい原子は不安定）。

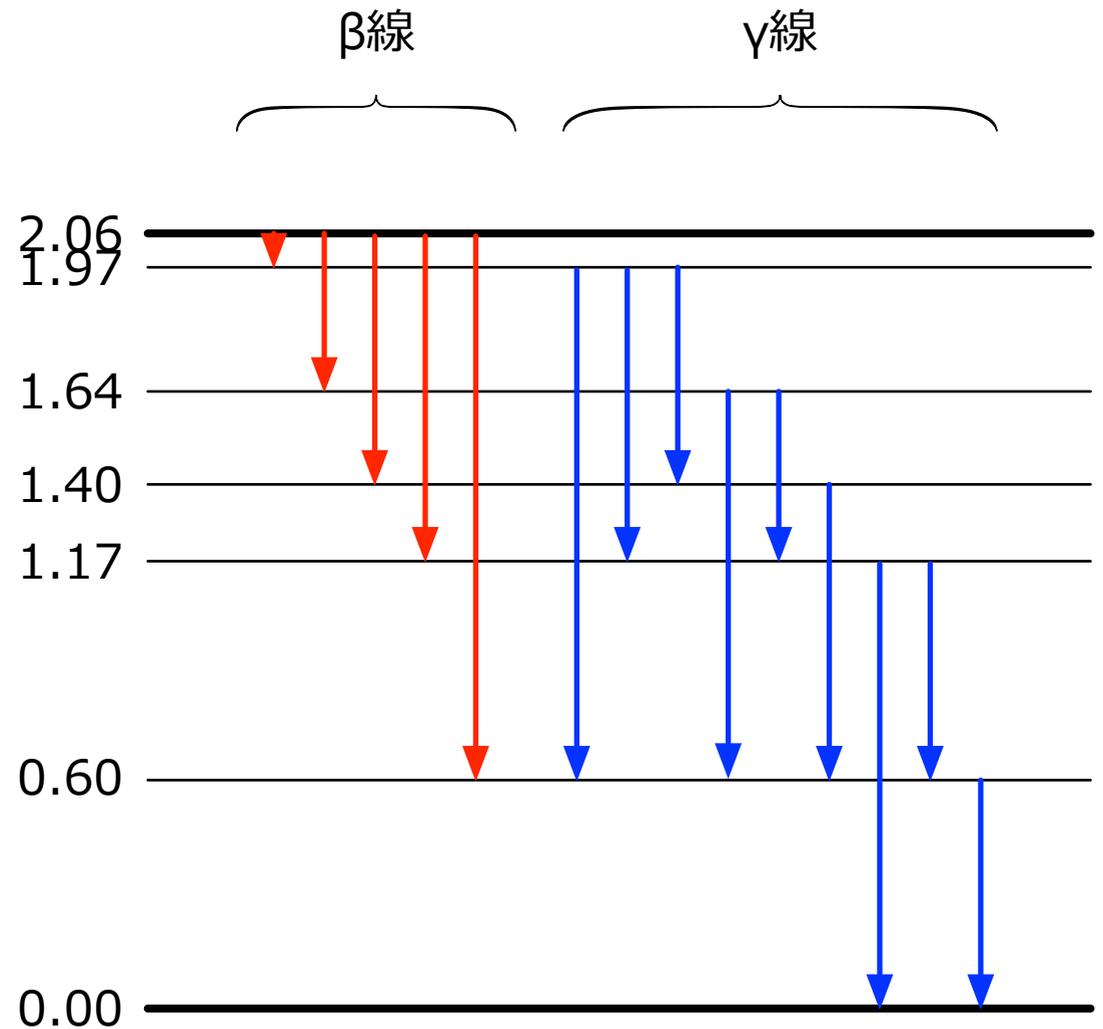
このため、陽子2個と中性子2個（=ヘリウムの原子核）を放出する $\alpha$ 壊変を繰り返し、少しずつ小さい原子核となって安定化して行く（資料末尾のスライド参照）。

# 壊変で放出されるエネルギーの分配例

$^{134}\text{Cs}$ は福島原発事故で放出された核種の一つで、半減期2年の $\beta$ 壊変核種。

$^{134}\text{Cs}$ の $\beta$ 壊変に伴って放出される総エネルギーは2.06 MeV。この一部が壊変で生じた電子の運動エネルギーとなり、 $\beta$ 線が発生する。

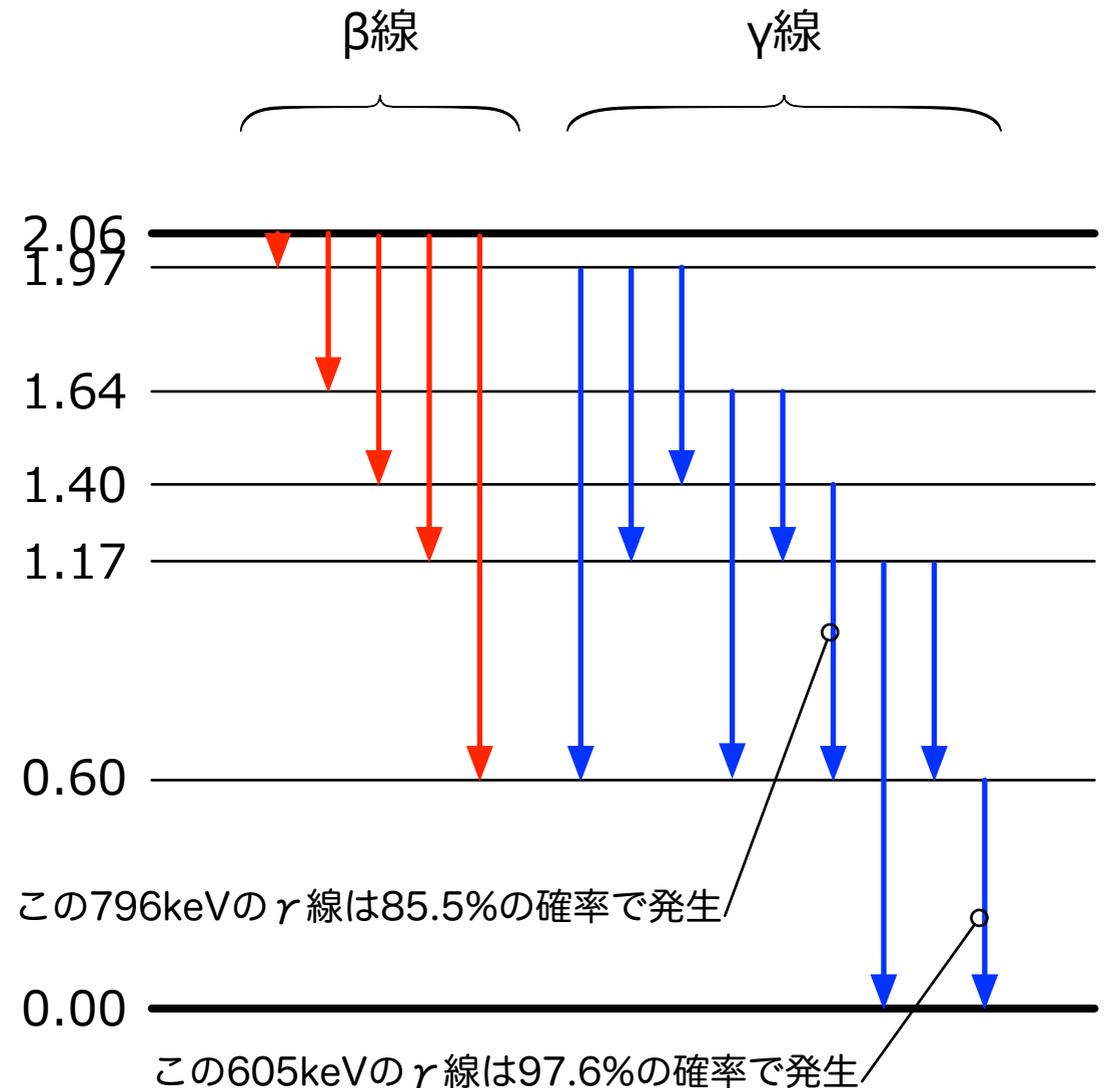
残りのエネルギーは（複数の） $\gamma$ 線として放出される。



# $\gamma$ 線測定による核種の定量

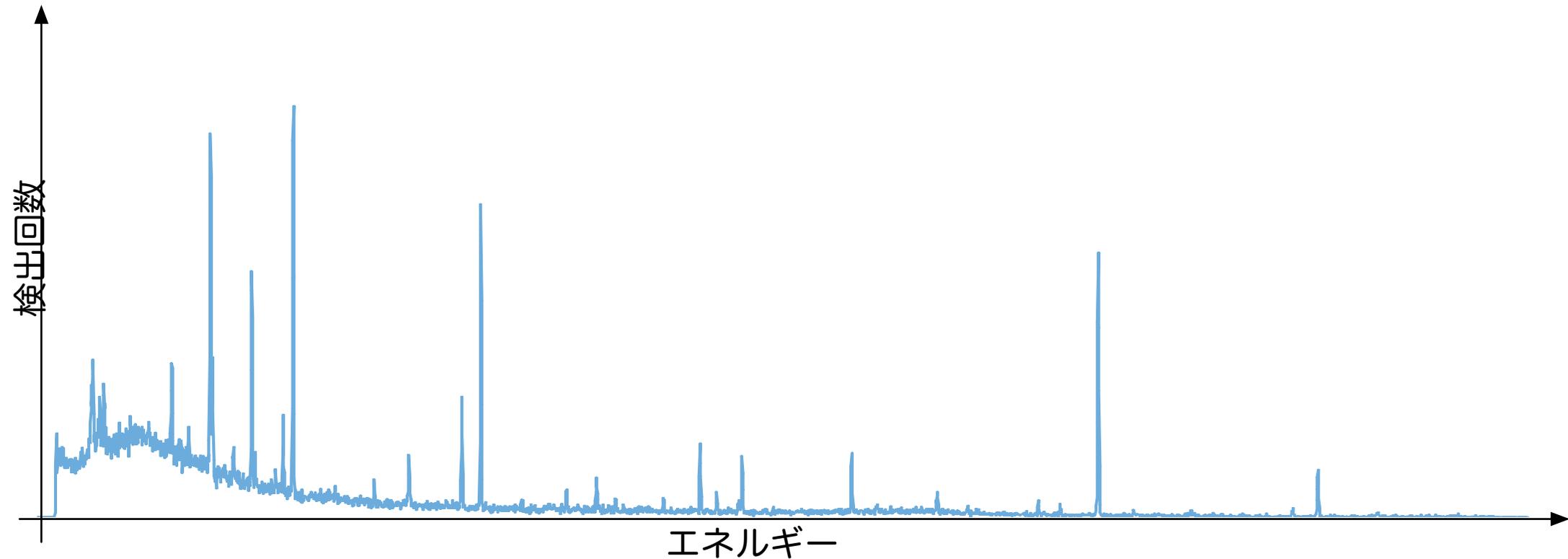
1回の壊変によって、各エネルギーの $\beta$ 線、 $\gamma$ 線が放出される確率は一定である。

エネルギー分解能の高いGe半導体検出器等を用いて $\gamma$ 線スペクトルを解析することで、試料に含まれる放射性核種の種類と量を測定することができる。



# $\gamma$ 線測定による核種の定量

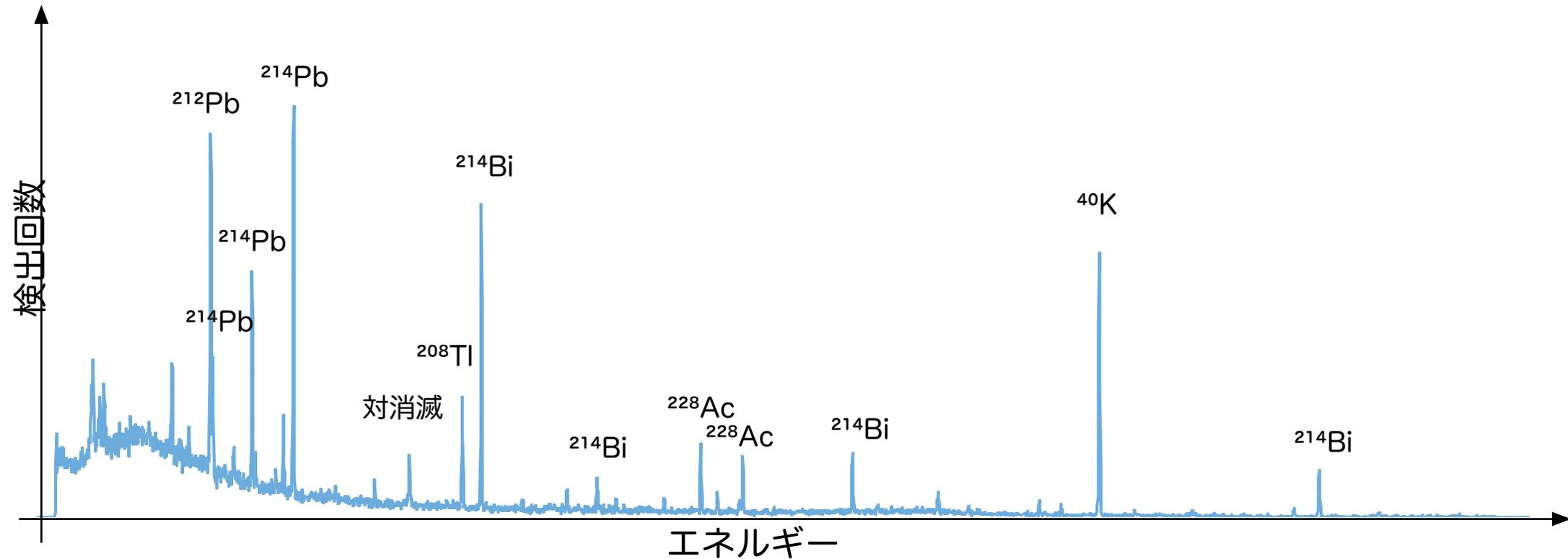
御影石のGe半導体検出器スペクトル



御影石（花崗岩）から出る $\gamma$ 線を測定すると、多数のピークが存在する。

# $\gamma$ 線測定による核種の定量

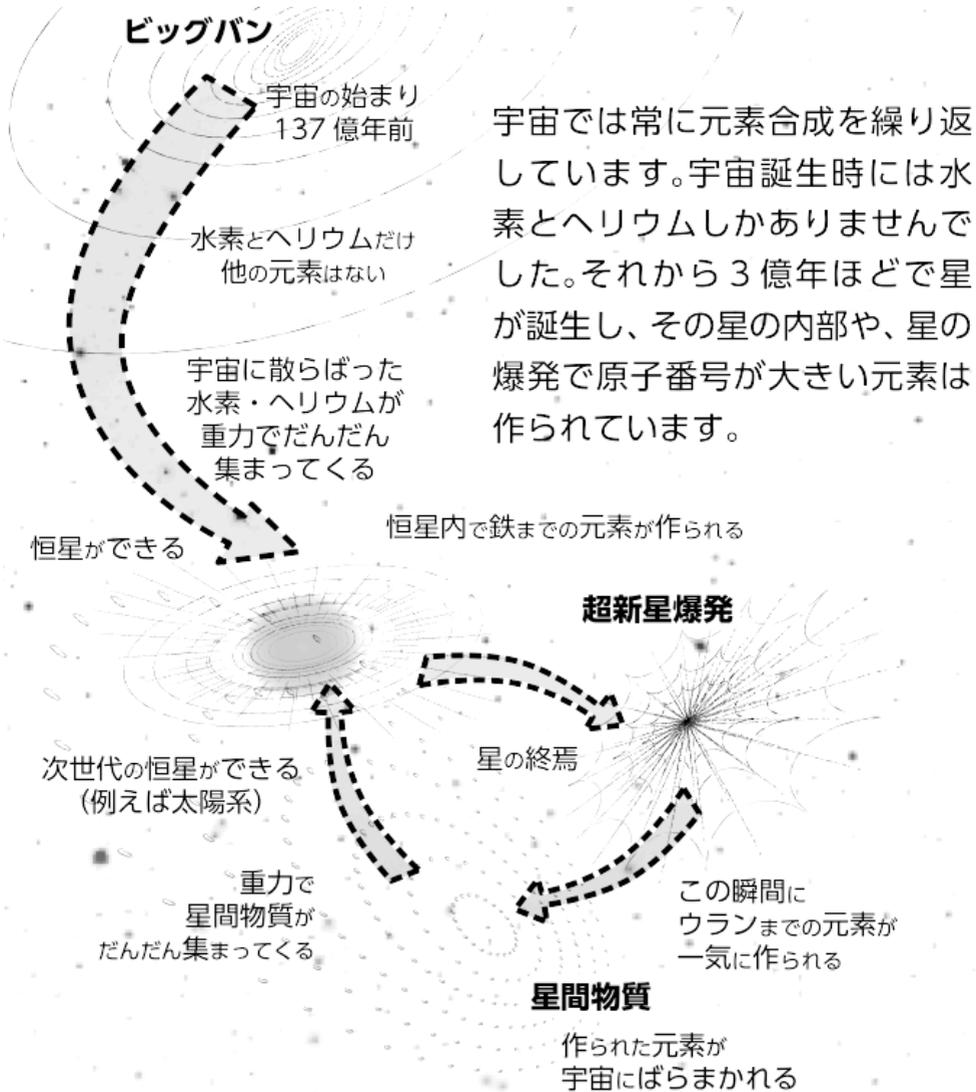
御影石のGe半導体検出器スペクトル



$\gamma$ 線のエネルギーを元にピークを同定すると、多種の天然核種が含まれていることが分かる（資料末尾スライド参照）。

# 放射性同位体の生成

## 恒星 - 超新星爆発



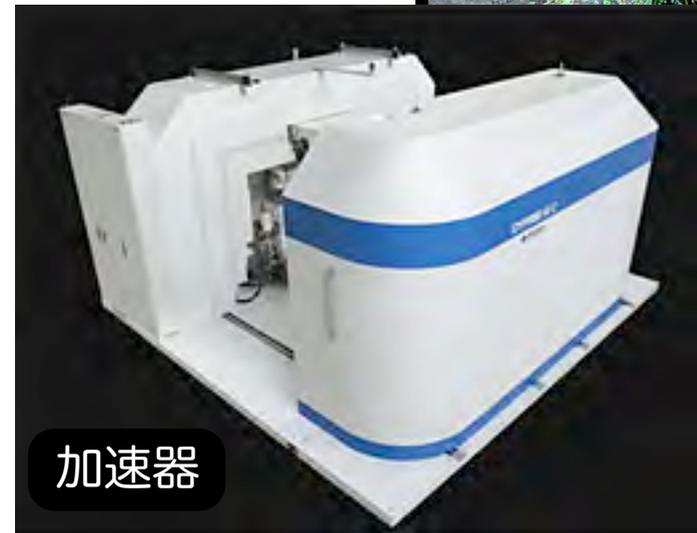
宇宙では常に元素合成を繰り返しています。宇宙誕生時には水素とヘリウムしかありませんでした。それから3億年ほどで星が誕生し、その星の内部や、星の爆発で原子番号が大きい元素は作られています。

[http://www.rarf.riken.go.jp/pub/enjoy/kakuzu/kakuzu\\_web.pdf](http://www.rarf.riken.go.jp/pub/enjoy/kakuzu/kakuzu_web.pdf)



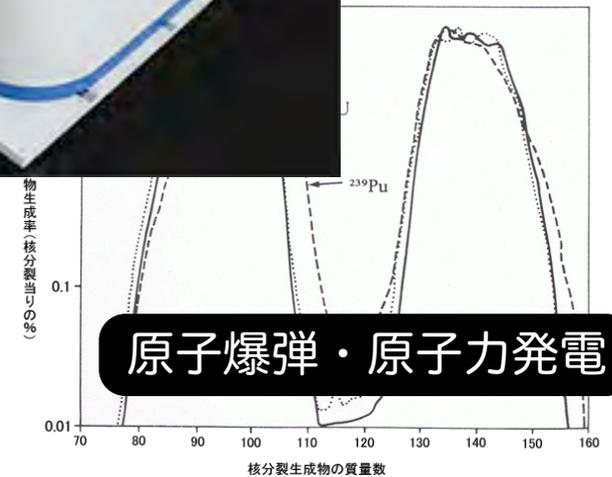
宇宙線と地球大気の反応

[https://en.wikipedia.org/wiki/Air\\_shower\\_%28physics%29](https://en.wikipedia.org/wiki/Air_shower_%28physics%29)



加速器

<http://www.shi.co.jp/products/medical/cyclotron/>



原子爆弾・原子力発電

図1 核分裂生成物の質量数分布  
【出典】W.マーシャル編：原子炉技術の発展(上)、裳華房、p.72

# 独習のための参考資料

放射線・放射性核種について独習したい方のためにリンク集を作成してあります。よろしければご利用下さい。

[http://www.agc.a.u-tokyo.ac.jp/wp/fg6\\_150413\\_learning/](http://www.agc.a.u-tokyo.ac.jp/wp/fg6_150413_learning/)

URLの入力が面倒な方は下記の手順でページを開くことができます。

- 1) 「アグリコクーン」で検索 → 2) 画面左のメニューで「FG6：農における放射線影響」をクリック
- 3) 画面を少しスクロールしたところにある講義日程表の「独習のための参考資料 (html版)」をクリック

The image shows a screenshot of the AGRI-COCOON website. On the left, there is a navigation menu with several items. The item 'FG6: 農における放射線影響' is circled in red. A red arrow points from this menu item to a seminar schedule table on the right. The table is titled '農業環境における放射線影響ゼミナール (大学院) / 農業環境の放射線影響 (学部) 日程表 (講義)'. It lists four seminars. The second seminar, on April 13th, has a link for '独習のための参考資料 (html版)' which is also circled in red. Other links for PDF, link, report, and Q&A are visible for each seminar.

農業環境における放射線影響ゼミナール (大学院) / 農業環境の放射線影響 (学部) 日程表 (講義)		
第1回 4月6日	●農環境の放射能汚染 田野井慶太郎 准教授 (農学生命科学研究科 附属放射性同位元素施設)	PDF link
第2回 4月13日	●放射性物質・放射線の基礎 広瀬 農 特任助教 (農学生命科学研究科 附属放射性同位元素施設) <b>独習のための参考資料 (html版)</b>	PDF PDF report
第3回 4月20日	●放射線の人体影響 広瀬 農 特任助教 (農学生命科学研究科 附属放射性同位元素施設)	PDF report Q&A
第4回 4月27日	●農学部の放射能汚染に対する取り組み 中西友子 教授 (農学生命科学研究科 附属放射性同位元素施設)	report

## 引用文献

あさりよしとお (2014) "まんがサイエンス 無料版 電子版", ver.1.0, 学研教育出版



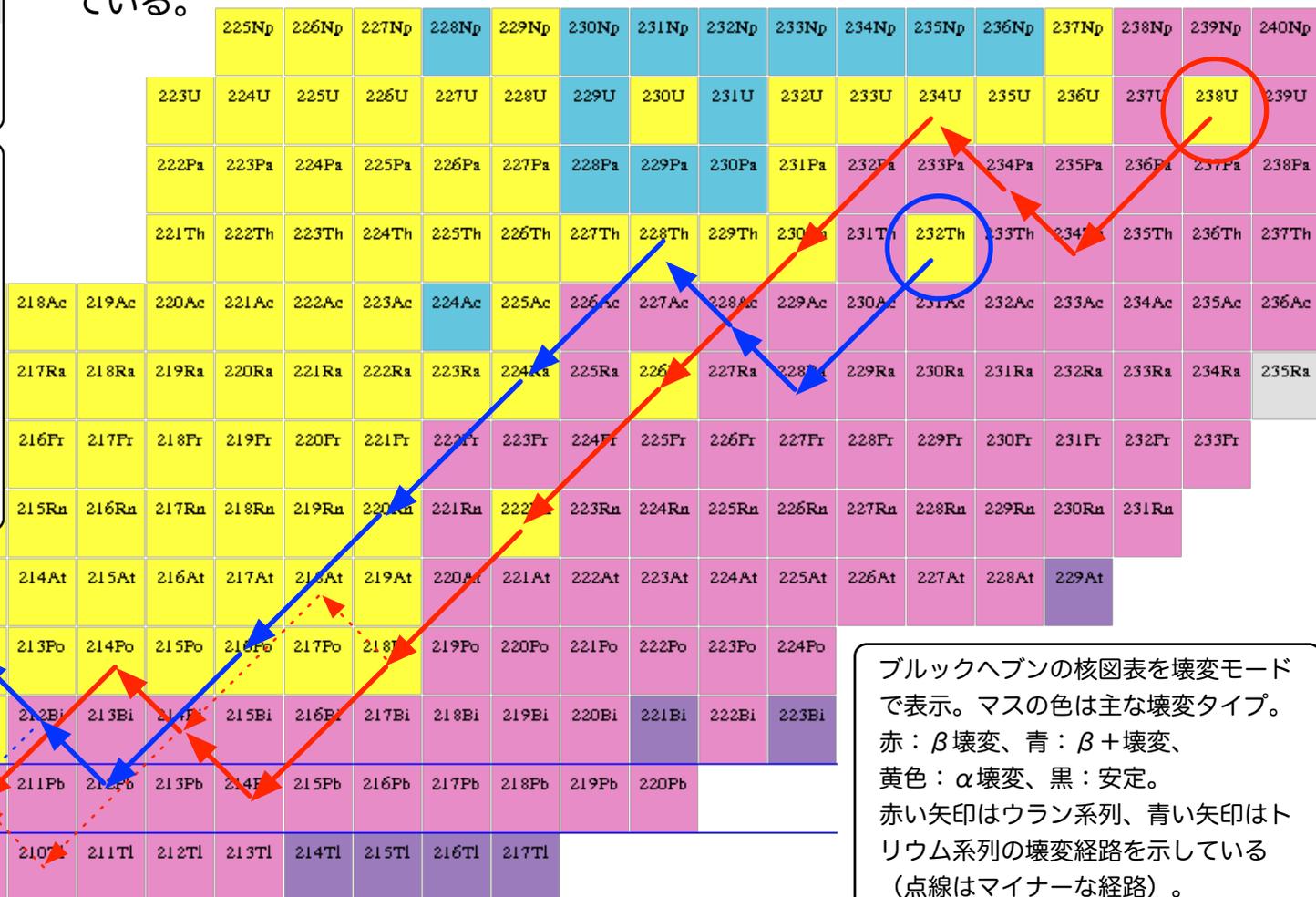
上の図は $^{232}\text{Th}$ 、 $^{238}\text{U}$ 付近のブルックヘブンの核図表を半減期モードで表示したもの。暗色が長半減期を示す。

赤丸で囲んだ3つの核種（特に $^{232}\text{Th}$ 、 $^{238}\text{U}$ ）は半減期が長く、地球誕生の際に取り込まれた成分がまだ残っている。

$^{235}\text{U}$ は核分裂を起こすので原発の燃料として重要だが、天然ウランの99%以上は $^{238}\text{U}$ である。

天然に存在する $\alpha$ 壊変核種の多くは $^{232}\text{Th}$ 、 $^{238}\text{U}$ を始点とする子孫核種。 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{238}\text{U}$ が環境中に広く分布しているため、その子孫核種も環境中に遍在している。

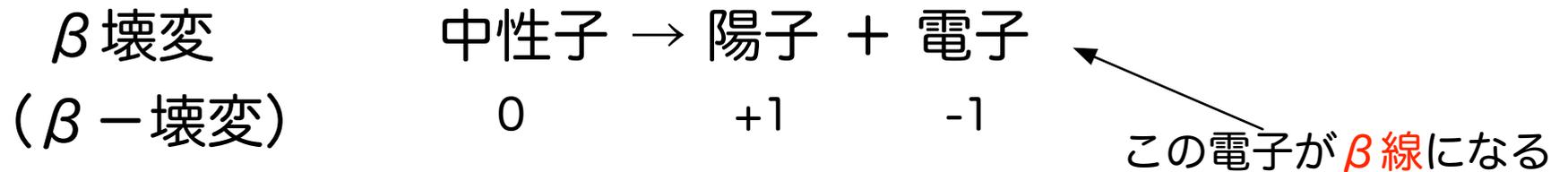
$^{232}\text{Th}$ の子孫（トリウム系列）、 $^{238}\text{U}$ の子孫（ウラン系列）以外では、同じく地球誕生から残存している $^{40}\text{K}$ や、大気と宇宙線の反応で生成する $^{14}\text{C}$ 、 $^3\text{H}$ 等も遍在している。



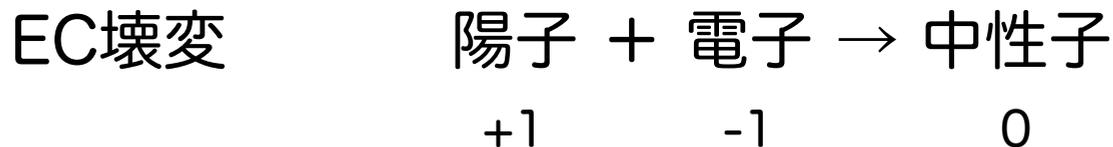
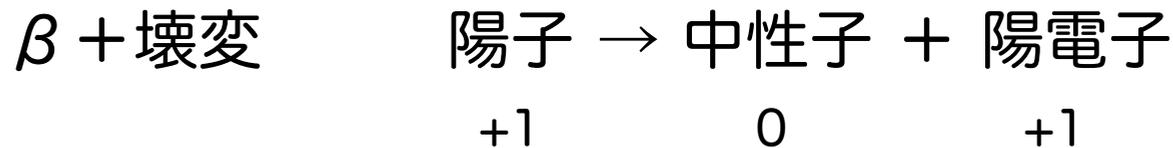
ブルックヘブンの核図表を壊変モードで表示。マスの色は主な壊変タイプ。赤： $\beta$ 壊変、青： $\beta+$ 壊変、黄色： $\alpha$ 壊変、黒：安定。赤い矢印はウラン系列、青い矢印はトリウム系列の壊変経路を示している（点線はマイナーな経路）。

# 広義の $\beta$ 壊変には、以下の壊変が含まれる

■ 左上に壊変 = 中性子が 1 個減り、陽子が 1 個増える



■ 右下に壊変 = 陽子が 1 個減り、中性子が 1 個増える



# $\beta$ 壊変まとめ

原子核には安定となる陽子：中性子比が存在し、そこから外れると不安定（＝放射性）になる。

不安定な原子核は、安定な陽子：中性子比を目指して壊変する。これを広義の $\beta$ 壊変と呼び、 $\beta$ 壊変、 $\beta^+$ 壊変、EC壊変が含まれる。

$\beta$ 壊変で生じる電子が壊変のエネルギーを受け取ったものが $\beta$ 線。

