

前回講義の補足について

皆さんに提出していただいたショートレポートの中に「 γ 線スペクトロメトリーの部分が良く理解できなかった」という趣旨の意見が複数ありました(全体の10%弱)。

このあたり、講義とスライドの練り方が甘かったと反省しております。

そこで前回の補足として、以下の内容を今回の講義前に説明したいと思います。

- ・ γ 線の放出パターンを示す「壊変図式」という図の紹介
- ・ γ 線スペクトルからの核種検索の実際 (Isotope Browser)
- ・ 連立方程式による混合各種スペクトルの解析の具体的な計算例

核物理学の知識が必要な質問について

以下の質問にお答えするには核物理学の知識が必要ですが、講師自身まだこの分野については独学しているところで、自信を持ってお答えできません。

申し訳ありませんが、興味がある方は核物理学の教科書に当たってみて下さい。

- ある核種において α 壊変と β 壊変のどちらが優先されるのか
- 低確率で α 壊変のみならず、 β 壊変も起こる元素は、 α 壊変しか起こらない元素と何が違うのだろうか？
- 核図表で ^{238}U や ^{232}Th の壊変系列が進む際に、いつ α 壊変から β 壊変に切り替わるのかがよくわからなかった。
- ^{238}U だと α 、 β 、 α 、 α 、 α 、と進んでいくが、これが α 、 α 、 α 、 β 、 α 、といったルートではダメなのでしょうか？
- なぜ壊変の種類は限られているのでしょうか。どうして好き勝手に原素(原文ママ)を放出しないのか。
- β 壊変、 γ 壊変ともに複数のパターンがあるとのことでしたが、その条件は何ですか？現状の知識で理解できるものでしたらお答えください。

壊変メカニズム等について

- オージェ電子の説明がわからなかった

今回取り上げたのは、一口に放射線と言っても実態はかなり多様であるということを示すためでした。したがって、ひとまずは「電子軌道の遷移によって、差分のエネルギーがX線として放出されるはずのところ、そのエネルギーが軌道電子に与えられて電子線として放出されることがある」程度の理解で十分です。少なくとも第4回目以降の講義内容の理解に支障は有りません。今後必要になった時(あるいは興味を持った時)に、より深く勉強していただければと思います。

- β +壊変では放出される陽電子が β 線ということになるのでしょうか？

そうです。明確に区別したい場合は β +線と呼ぶことになると思います。

■EC壊変では β 線は放出されないのでしょうか？

放出されません。ただし、原子核による軌道電子の捕獲に伴って軌道電子の遷移が起こりますので、X線が出ます。

壊変に伴うエネルギーはニュートリノに与えられます。また、他の β 壊変と同様に、 γ 線が放出されることもあります。

■核図表での黒い安定同位体が微妙に対角線からずれている部分には、どういう理由があるのか気になった。

一般に、陽子数、中性子数は偶数の方が奇数より安定なことが知られています。ある程度以上大きい核の場合、陽子数と中性子数がともに奇数の場合は陽子：中性子比が適正でも不安定となり、その一方で比が少し偏っていても偶数であるために安定な場合が有ります。このために安定核が対角線から少しずれたり不連続になったりします。

また、希ガスの電子配置が安定であるのと似た現象として、原子核内の陽子・中性子にも安定な構造を取る陽子数・中性子数が存在し、魔法数（マジックナンバー）と呼ばれています。例えば魔法数の一つである50を陽子数として持つSnのところでは、横に長く安定同位体が並んでいることが分かると思います。

ATOMICA「原子核物理の基礎（2）原子核の壊変」

http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=03-06-03-02

■ウランやトリウムのような半減期が非常に長い原子は実用的には安定していると考えて良いのだろうか。

ここでいう「実用的」の意味にもよりますが、少なくとも100年程度ではその原子数がほとんど減少しないという意味では安定していると言って良いと思います。

■ α 壊変で陽子、中性子が2ずつ減った後、電子はどうなるのですか？（2つあまると思います）

これは私も気になって調べてみたのですが、自分自身の知識不足もあり、今のところ明確に理解できていません。

ただ、 α 粒子を放出した残りの原子は α 粒子の影響を直近で受けるために電離することが多く、余った2個の電子を保持した状態が維持されるわけではないようです。

■壊変は温度が高ければ高い程発生しやすいのですか？

「温度が高い→壊変が起こる」ではなく、「壊変が起こる→温度が上がる」という関係です。原発の燃料は二酸化ウランを主成分とするペレット状です。核分裂停止直後の燃料ペレット内には核分裂で生じた多量の β 壊変核種が残っており、この核種の壊変で出た放射線の運動エネルギーは燃料ペレットに吸収されて熱に変わります。通常は冷却水でこの熱を逃がすのですが、事故の際には冷却水を循環させることができなくなり、逃げ場が無くなった熱によってメルトダウンが起きてしまいました。

■ β 壊変、 α 壊変がどういうものか大体はわかるが、だからどうなるかは詳しくわからない（身近なところで何に関係しているか等）

第3回講義の被ばくリスクについての説明の際にもお話しますが、我々は天然の放射性核種の α 壊変、 β 壊変によって実際に被ばくしています。

被ばく以外の関係を挙げるとすると、地熱のかなりの部分は ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K （および子孫核種）の α 、 β 壊変によるものと考えられていますし、我々が寒剤等として利用しているHeの多くは地殻中の α 壊変

で生じたものと考えられています。ちなみに大気中の Ar の多くは ^{40}K の (広義の β 壊変である) EC 壊変によって生じたと推定されています。

■「半減期 2 週間の ^{32}P は、約 178 万個の原子が存在すると 1 秒間に 1 回壊変が起こる」ということが良く分からないです

半減期が短い (不安定な) 放射性同位体は原子 1 個あたりの壊変回数が多い、つまり同じ原子数の場合、半減期が長い放射性同位体よりも Bq が多くなるということを示すための説明でした。半減期が短い ^{32}P は、半減期の長い ^{137}Cs よりもずっと少ない原子数で 1Bq に相当するという事です。

■ニュートリノについて詳しく知りたいです

専門で取り組んでいる方々の解説記事がありますので、こちらを参照してください。

スーパーカミオカンデについて「ニュートリノとニュートリノ振動」

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/sk/neutrino.html>

放射性同位体の生成について

■加速器内での粒子の衝突の仕組みが知りたくなった

18F などの合成には、静止したターゲット物質に加速した粒子を衝突させる装置が使用されており、衝突の仕組みは比較的シンプルです (装置内のターゲット物質に、加速粒子のビームを当てれば衝突します)。加速の方法等で様々な方式がありますが、線形加速器 (リニアック、ライナック)、サイクロトロン、シンクロトロンなどが代表的な加速器です。

一方で、高エネルギー粒子同士が衝突する際の反応などを知るための研究には、加速した粒子同士を衝突させる装置 (コライダー/衝突型加速器) が使用されることも有ります。こちらの仕組みはコライダー (collider) (もしくは衝突型加速器) をキーワードに、専門の資料にあたって下さい。

■R プロセスによって、S プロセスではつukれないウランが作られたのはわかったが、なぜウランより質量数の大きな原子は作られなかったのかを疑問に思った。

作られなかったかどうかは分かりませんが、仮に作られたとしても現在地球に存在しない理由は、核図表から推測できます。核図表の ^{238}U 周辺で、 ^{238}U よりも質量数が大きく、比較的長半減期の核種をピックアップすると以下ようになります。

^{247}Cm 半減期 1.56×10^7 年

^{248}Cm 半減期 3.48×10^5 年

^{242}Pu 半減期 3.75×10^5 年

^{244}Pu 半減期 8.00×10^7 年

最も半減期が長い ^{244}Pu でも 8000 万年しかないため、地球誕生から約 45 億年として計算すると半減期 56 回が経過しており、仮に地球に取り込まれていたとしてもほぼ全てが壊変してしまっていることが分かります。

一方、スペクトル観測の結果から、宇宙には比較的半減期の短い重い元素 (例えば Es=アインスタイニウム) を含む星が存在することも知られています。

Wikipedia 「HD 101065」

https://ja.wikipedia.org/wiki/HD_101065

■Bi より重い原子は超新星爆発により生成したとありましたが、それがどのようにして解明されたのか、疑問に思いました。

ご紹介した理研の映像資料（2006年のもの）では超新星爆発による可能性が高いと解説されていましたが、その後の研究でもう少し違う可能性が出てきているようです。例えば下記の解説をご覧ください。

理化学研究所「金やウランなどの重い元素は中性子星の合体で作られた可能性が高い」

http://www.riken.jp/pr/press/2014/20140717_2/

■陽電子はどれくらいの量、自然界に存在するのだろうか？壊変の際以外には、発生源はないのだろうか？

壊変以外の発生源として、陽電子と電子（の質量）が対消滅して電磁波（エネルギー）になるのとは逆に、電磁波のエネルギーから陽電子と電子が「対生成」することがあります。宇宙線と大気の実験などで、それほど珍しくない確率で生成していると思われま

Wikipedia「空気シャワー」

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A9%BA%E6%B0%97%E3%82%B7%E3%83%A3%E3%83%AF%E3%83%BC>

自然界での陽電子の発生については最近面白い解説記事を読みました。雷雲の中で¹³Nや¹⁵Oといったβ+壊変核種が生成し、陽電子が放出されていることを明らかにしたというものです。私自身はβ+崩壊する核種は天然にはほとんど存在しないと思込んでいたのですが、考えを改めました。

和田 and 榎戸（2018）「雷による光核反応の発見」

https://www.jrias.or.jp/books/pdf/201808_TRACER_ENOTO_HOKA.pdf

■ウランの先に「安定の島」が存在するという仮説にはどの程度信ぴょう性が有るのか？どうやって目指しているのか？

残念ながら、「安定の島」の信ぴょう性について判断できるだけの知識が私にはありませんが、核図表を見る限りでは魔法数という法則自体は確かに存在すると思います。ですので、重い原子核における魔法数の予測が正しければ、二重魔法数を持つ安定な超重核種が有っても不思議では無いと思います。

どうやって目指しているかということについては、例えば理研の仁科加速器センターでは、何らかの方法で生成した不安定核（放射性核種）を衝突の材料とすることが糸口になると考えているようです。

理化学研究所 仁科加速器科学研究センター「113番元素特設ページ／次なる挑戦」

<https://www.nishina.riken.jp/113/challenge.html>

■実験的にニホニウム（Nh）などを作る際にはどのようにしているのでしょうか？

研究グループの解説記事を参照するのが良いと思います。例えば以下のウェブページが有ります。

理化学研究所 仁科加速器科学研究センター「113番元素特設ページ」

<http://www.nishina.riken.jp/113/>

放射線測定等について

■2号館の外壁のデータを見た瞬間、Ge半導体検出器は施設の外に持ち出せるのかと思ってしまった。

屋外で使用できるタイプのGe半導体検出器も有ります。

実際、我々の施設で使用している Ge 半導体検出器のうち 1 台は、以前はポータブルタイプだったものを固定式に変更して使用しています。

放射能測定法シリーズ No.33 「ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法」

<http://www.kankyo-hoshano.go.jp/series/lib/No33.pdf>

■農学部 2 号館の外壁を分析した結果 ^{137}Cs が検出されたということだけど、 ^{137}Cs は放射線を出すものでしたっけ？ そうだとしたら僕たちはバンバン放射線を体に受けているということになるんですかね？

そうです。バンバン受けています (^{137}Cs からの放射線に限らず)。それによる具体的な影響については第 3 回講義で解説します。

■福島では玄米をシンチレーション検出器で調べているようだが、それに引っかかってしまう玄米はどれくらいだろうか？ 引っかかるものがないとすれば、福島の放射線は元にもどってきているということなのだろうか？

第 4 回以降の講義で、この 2 つの質問の答えが得られます。楽しみにしててください（ですので、私の講義の中では回答を差し控えます）。

■広島や長崎に投下された原子爆弾に使用されたウランは半減期が長いということは、放射線自体はそれほど放出されていないということですか？

原爆の材料となる ^{235}U や ^{239}Pu そのものは半減期が非常に長いので、壊変で放出される放射線は物質質量（モル数）の割には少ないです。

ただし、これらの核種が核分裂する際は放射線（中性子線や γ 線）が放出されますし、第 2 回講義の後半でお話したように、核分裂で生成した二つの破片は ^{235}U や ^{239}Pu よりも半減期が短い β 壊変核種です。核分裂の際に生じる放射線には中性子線が含まれていますので、これを照射された地面や建物内の原子の一部も β 壊変核種になり、放射線を出すことにも留意が必要です。

■Isotope Browser の周期表が横向きなのはなぜですか？

メニューの「周期律表」をタップすると表示される周期表のことでしょうか？ 自分の環境だと普通に表示されるため、環境依存の問題かもしれません。

■測定費用が知りたい（Ge 半導体検出器、シンチレーション検出器、 α 、 β 測定）

Ge 半導体検出器については、本体、遮へい体、マルチチャンネルアナライザーなど一式の初期費用がおおよそ 2000 万円、これに液体窒素や空調の電気代、定期的な校正・修理等で 100 万円/年程度がかかります。これらに加え、測定操作を行う方の人件費も必要です。

シンチレーション検出器はオートサンプラー付属のタイプでも初期費用が Ge のおおよそ半分程度だと思います。

β 線については装置の費用はシンチレーション検出器程度ですが、前処理操作が煩雑なため、化学分析可能な施設に加え、操作に習熟した方の人件費が必要です。