

# 放射性変化

## Radioactive Change

Rutherford E<sup>\*1</sup>, Soddy F<sup>\*2</sup>. Philosophical Magazine 5:576-91, 1903

### 1. 放射性変化の生成物とその特徴的な物性

以前の論文で、ラジウム、トリウム、ウランの放射性が、一過性の放射能を有する新しい物質の持続的な生成によって維持されていることを示した。新物質は原物質と化学的に明瞭に異なり、化学的処理により分離できる場合もある。その例として、トリウムから生成するトリウムX、ウランから生成するウランXが挙げられる。新物質が気体で、単純な拡散によって分離される場合もあり、トリウム化合物、ラジウム化合物が発生する放射性エマナチオンはこの例である。このようなエマナチオンは、冷却により凝縮し、再び気化できる。エマナチオンは明らかな化学的親和性を示さないが、しばしば固体の原物質に捕捉され、溶液中に放出される。大気中では速やかに拡散し、多孔性隔壁を通過し、一般に比較的高分子量をもつ不活性ガスのふるまいを示す。気体状エマナチオンがさらに変化して非気化性の新物質が生成される場合もある。この場合は、放射性物質からの分離過程の中間物質として存在することになる。この例としては、トリウム化合物やラジウム化合物の近傍にある物質に誘導される、特定の性質を有する放射性物質が挙げられる。例えば、トリウムにより誘導される放射性物質は一定の高温で気化して周囲の物質に再沈着し、ある種の溶剤に溶解し、その他の物質には溶解しない特徴を持つ。

つまりこれらの新しい物質が一般的な物質と異なる唯一の点は、通常の化学分析、スペクトル分析では検出できないほど微量であるという所にある。特定の物質の存在に異論を挟む余地がないことの例として、自然界に存在するラジウム自体についても同じことが言えることが挙げられる。閃ウラン鉱中のラジウムはいかなる化学分析、スペクトル分析も検出できず、何回も濃縮して初めて特徴的なスペクトルが姿を現わす。Curie夫人とGieselは、何トンもの閃ウラン鉱を処理して相当量の純粋なラジウム化合物を手にし、この結果ラジウムが特徴的な性質をもつ元素であることを明らかとした。また、放射能によってその存在が発見されたさまざまな他の新物質も、ラジウムと同じく、その量を無制限に増やすことが可能であれば、従来の方法で解析できるようになることは疑いのないところである。

### 2. 変化と放射の同時性

本稿では、これらの新しい物質が生成される変化(change)の性質について考察する。これまで蓄積した実験的証拠は、かなりの確度を以てこの過程の性質に関する一般的理論を確立するに十分なものである。この証拠から、放射能とその変化の間には、放射性物質の生成についてこれまで考えられてきた以上に密接な関係があることがたちに明らかとなった。これまで研究した放射能の変化はすべて、ある物質による別の物質の生成に帰結される(当面、放出される光線については無視する)。複数の変化が起こる場合、これらは同時ではなく連続的に発生する。例えばトリウムはトリウムXを生成し、トリウムXはトリウムエマナチオンを生成し、エマナチオンは誘導放射能をひきおこす。それぞれ物質の放射能は、それ自体が生み出された変化ではなく、それが次の新しい物質を生み出す変化に結びついている。例えば、トリウムXがそれを生み出すトリウムから分離すると、トリウムXの放射能はそれが生み出すエマナチオンの量に比例し、トリウムXの放射能とエマナチオンを生み出す力は、同じ法則、同じ比率で減衰する。次の段階で、エマナチオンは誘導放射能を引き起こす。エマナチオンの放射能は1分で半減し、それによって電界の陰極に誘導される放射能も同じ率で低下する。これらの結果は、ラジウムの場合も全く同じである。ラジウムエマナチオンの放射能は、4日で半減し、それが誘導放射能を生む力も同様である。

従って、放射能を既に起こった変化の結果と見なすことは不可能である。放射される光線は、放射性物質系の次の生成物への変化に随伴するものでなくてはならない。

### 分離不可能な放射能

この観点はただちに、3つの放射性物質のそれぞれに、化学反応によって分離できない持続性の放射能が存在することを意味する。この分離不可能な放射能は、放射性元素自体の最初の新しい物質への一次変化に伴う放射線である。トリウムの場合、 $\alpha$ 線放射の約25%が、トリウムからトリウムXへの最初の変化に随伴する。ウランの場合は、 $\alpha$ 線放射の全てが分離不可能であり、ウランのウランXへの変化に随伴する。

変化に放射線放出が随伴するという結論は、いくつかの重要な帰結を伴う。放射性を持つ物質は、それ自体が変化している。従ってこれらの新しい放射性物質

<sup>\*1</sup> M.A., D.Sc. Macdonald Professor of Physics, McGill University

<sup>\*2</sup> M.A. Oxford University

(ウランX, トリウムX, 2つのエマナチオンなど)が、既知のいずれかの元素と同一ということはあり得ない。これらは短時間しか存在せず、その放射能の減衰は量の持続的減少を反映するものである。その一方、この変化最終生成物は放射性ではありえないのに、この過程には少なくとも1つ、実験可能な範囲外の段階が常に存在すると考えられる。このため、この変化の結果生じる最終生成物は未知のままで、その量は放射能の測定以外には知る方法がない。放射性元素を含む天然鉱物では、これらの変化は非常に長期間にわたって一定に進行していると考えられ、最終生成物は散逸しない限り十分検出できるだけ蓄積し、自然界において放射性元素に常に随伴する元素として認められるようになると考えられる。これらの論拠から、我々はヘリウムがおそらくこのような最終生成物であることを既に示唆しているが、もちろんこの示唆は現状では純粋に推測に基づくものでしかない。しかし、放射性鉱物をさらに研究することにより、この重要な問題についておそらくさらなる証左が得られるであろう。

### 3. 放射線の物質的特性

いずれの系についてもの変化に際して光線が発生することは、 $\alpha$ 線の電気的、磁気的な偏向可能性の発見により強力な証拠を得ることになった。偏向は $\beta$ 線あるいは陰極性と反対方向で、従って $\alpha$ 線は正の電荷を持つ高速の物体である(Rutherford. Phil Mag. Feb. 1903)。速度は $2.5 \times 10^9$  cm/秒のオーダーであることが示されている。電荷とその質量の比 $e/m$ は、 $6 \times 10^3$ のオーダーである。ここで陰極線の $e/m$ は約 $10^7$ である。両者の電荷が同じと仮定すると、正に荷電した放出粒子の見かけの質量は陰極線の1,000倍以上となる。いま、電解水中の水素原子の $e/m$ は $10^4$ である。従って、 $\alpha$ 線を構成する粒子は水素原子と同程度の質量のようにふるまう。すべての放射性物質、それから生成するさまざま放射性物質から発生する $\alpha$ 線は類似の性質を有し、透過力がわずかに異なるだけである。従って、 $\alpha$ 線は一般的な放出物体であり、水素原子と同程度の質量をもち、同じ元素から放出されて容易に偏向する $\beta$ 線を構成する放出粒子の質量に比べて非常に大きい、ということを強く示唆する理由が存在する。

放射能において2種類の放射線が果たす役割については、明らかに $\alpha$ 線がはるかに重要である。いずれの場合も、放出エネルギーの99%を $\alpha$ 線が占め[1]、 $\beta$ 線は透過力、写真効果について良く知られているが相対的に果たす役割は小さい。

3つの放射性元素の分離不可能な放射能、2つのエマナチオンの放射能、そしてラジウムの誘導放射能の第1段階はいずれも $\alpha$ 線のみから成る。変化の進行を実験的に追跡した限りでは、 $\beta$ 線あるいは陰極線が登場するのはこの過程のほとんど最終状態に近い時点です

ある[2]。

この知見は、単にこの荷電粒子の放出が物質の変化に随伴するだけでなく、この放出こそが変化の本態である、と考える十分な理由である。

### 4. 放射性変化の法則

放射性物質からの放射が物質変化に随伴するという見方は、放射能減弱の法則に非常に明確な物理学的意味を付与するものである。放射性物質を分離して、それを生成した放射性物質あるいはそれが変化して生成する放射性物質と別個に放射能を測定すると、いずれの場合も計測したすべての条件下で、その放射性は時間とともに指数関数的に低下することが見いだされた。これは、次の式で表わすことができる。

$$\frac{I_t}{I_0} = e^{-\lambda t}$$

ここで、 $I_0$ は放射線による初期の電離電流、 $I_t$ は時間 $t$ 後の電流、 $\lambda$ は定数である。各光線あるいは放出粒子は、一般にその経路に沿って一定数のイオンを生成し、従って電離電流は1秒間に放出される粒子の数に比例する。

ここで $n_t$ は時刻 $t$ における単位時間当たりの放出粒子数、 $n_0$ は初期の粒子数である。

$$\frac{n_t}{n_0} = e^{-\lambda t}$$

1つの系が1つの光線を生成するとすると、時刻 $t$ において変化していない系の数 $N_t$ は、

$$N_t = \int_t^\infty n_t \cdot dt = \frac{n_0}{\lambda} e^{-\lambda t}$$

初期の系の数 $N_0$ は、 $t=0$ とすることにより得られる

$$N_0 = \frac{n_0}{\lambda}$$

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

変化する系が、2つあるいは一定数の光線を生成する場合も、同じ法則が成り立つ。

これを微分すると

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N_t$$

[1] この数字の根拠とした論文(Phil Mag. p.329, Sept, 1902)では、明らかに計算の間違いがある。1,000倍でなく100倍である。

[2] 放射性元素は、 $\alpha$ 線、 $\beta$ 線以外に、非常に透過性の強い第3の光線を放出している。ラジウムだけでなくトリウムもこれを放出しており(Rutherford, Phys Zeit. 1902)，その後ウランも同様であることが見いだされた。この光線が放射性変化において果たす役割について論ずるには、まだ十分研究が進んでいない。

すなわち、任意の時刻における系の変化率は、常に変化せずに残っている系の数に比例する。

従って、放射性変化の法則は次の二言で表現できる：単位時間当たりに変化する放射性物質の相対量は一定である。総量が変化しない場合（物質の供給率と変化率が平衡点にある場合にはほぼ満たされる条件である）、単位時間当たりに変化する全体の比率は定数 $\lambda$ で表わされ、各放射性物質はそれぞれ一定、固有の値を有する。従って、 $\lambda$ は「放射性定数」と呼ぶことができる。放射能現象の複雑さは、いくつかの異なる変化物質が同時に次々に変化し、それぞれが異なる放射性定数を持つことにある。

## 5. 放射能の保存

導き出された放射性変化の法則は、計測したすべての段階について成立することから、現象一般について成立するものと考えられる。放射性定数 $\lambda$ は、非常に広い温度範囲、非常に強力な化学的、物理的条件下で変化しなかった。この法則は、我々の研究全体の結果として到達した一般原理の数学的表現であると言える。現在の知識では、放射能は既知の制御可能な力の範囲外にあり、生成も修飾も破壊できない現象である。重力のように、関連する物質の量にのみ比例し、この限られた意味においては、放射能保存の法則 [3] が成立すると言える。もちろん放射能は特別なもので必ずしも物質の普遍的な特性ではなく、物質により種類、程度が異なるという点で、重力とは異なっている。放射能の過程では、このような異なる種類の変化が次々に起こって非放射性物質になり、それに応じて放射能が変化する。従って、放射能の低下は放射性物質の消失に、放射能の回復はその生成に帰されるものである。2つの過程が均衡すると（この条件は密閉空間における放射性元素でほぼ満たされる）、放射能は一定となる。しかしこの見かけの定常性は、放射性元素の緩徐な変化率の単なる表われに過ぎない。十分に長い時間で見れば、その放射能は放射性変化の法則に従って減少していく。さもなければ、放射性変化が物質の生成に関与しているとみなす必要が生じてくる。従って我々が現在知るところによると、宇宙全体の放射能は減少しつつありやがて消失することになる。

このように放射性過程によって解放されるエネルギーは、エネルギー保存則に反するものではない。

この考え方は、放射能がその関与する物質の量に関して、すべての考え得る条件下で保存されるということを意味するものではない。またこれを発生させる過程を制御する方法を発見することが不可能であることを示唆するものでもない。ここに述べた原則は、もちろん現在の我々の実験による知識とその解釈にのみ当てはまるものである。

この原理が立つ全般的な証拠は、放射能全体を包括するものである。Becquerel および Curie はウラン、ラジウムからの放射線が、いずれも長期間にわたって一定であることを示した。Mme. Curie は、放射能が元素の特異的な特性の1つであると述べ、閃ウラン鉱からのラジウム分離成功は、この性質に基づく方法の直接の帰結であった。放射性元素から強力な放射性成分を分離する可能性は、最初は矛盾するように思えたが、詳細な研究の結果この考え方を支持する以外のなにものでもなかった。いずれの場合も、除去されるのは放射能の一部のみであり、これは時間とともに放射性元素によって回復する。Mme. Curie が元来主張する、放射能は元素の特異的な特性であるという点については疑問の余地がない。仮に今後ウランやトリウムが最終的に一定割合の少量の新しい放射性元素との混合物であると判明したとしても、全体の考え方には変わることはない。

次に、我々の研究を通じて、放射能が非放射性元素から生成されたことや、あるいは放射性元素の放射能が破壊されたり変化したりしたことは1回も無かった。またこのような生成や破壊が発生するという記録も現在のところ存在しない。後に放射性変化は原子崩壊の性質に他ならないことを示すが、化学において元素の変換が不可能であるという普遍的な経験からこの結果は予測しうるものである。同じ理由により、放射性変化の速度が、既知の物理的あるいは化学的原因に左右されることも考えられない。最後に、放射能保存の法則は、放射性変化のエネルギー関係に矛盾しないものである。この点については第7節でさらに詳しく検討するが、この場合のエネルギー変化は、分子レベルの場合に比べてはるかに大きなオーダーである。

ここで、放射能保存の法則に関する明らかな例外について簡単に考察する必要がある。まず、トリウムおよびラジウムの種々の化合物のエマナチオン効果は、それの中でも大きく異なり、また物理的状態によつても大きく左右されることを銘記する必要がある。最近、このような多様性は、エマナチオンが周囲の大気中に逸脱する速度によって変化することが証明された（Phil Mag 453, April 1903）。トリウム、ラジウムのエマナチオンは、エマナチオンの無いもの、高度のエマ

[3] 以下の議論とは別に、この用語は、いずれの放射性元素の任意の量について、全放射能（放射性元素に固有の放射線計測による）が、実験したすべての条件下で一定であったことに関して便宜的な表現である。放射能の平衡状態が破れると、放射能はもともとの元素から分離しうる1つあるいは複数の放射性生成物に配分され得る。しかし、この変化を通じてエネルギーの総計は常に一定である。

3つの放射性元素の放射能に「保存」という表現を適用することは、実際に観察しうる時間内に起こる変化は極めて微量であることから、実用上は問題ない。しかし厳密に言えば、「保存」は一定量の放射性物質についてのみ適用され、自然界ではその量は自発的に持続的に減少している。従って、誤解を避けるためには、この言葉をこの狭い意味に限って使う必要がある。

ナチオンを発生するものいずれにおいても同じ速度で生成される。しかし前者では化合物中に蓄積、封入されてゆく。この蓄積量を、同量の溶解化合物から1秒間に生成される量を比較すると、放射能保存の法則を完全に確立するための非常に厳密な実験が可能である。もう一つの例外は、トリウムにより白金線に蓄積された放射能の白熱燃焼による破壊である。この現象は最近 Miss Gates の研究室で実験されたもので、放射能は破壊はされないが、一定の温度で気化して周囲の表面に量は変わらず散在に再沈着することが見いだされた。

### 放射性「誘導」

多くの研究者が放射性「誘導」の考え方について報告している。これは、非放射性物質を放射性物質と混合したり、あるいは放射性物質の近傍に置いたりすると、放射性が誘導される現象である。この説は、Becquerel によって、放射性物質の塩溶液内に形成されるある種の沈澱物（特に硫酸バリウム）が、それ自体放射性であることを説明するために提唱されたものである。この説明は、非放射性元素に放射能が存在する多くの例において、新たな放射性元素の存在を仮定することなく説明できることから非常に有用であるが、我々の知見はこれを容認し得ないものである。

過去の報告例の大部分は、単に放射性物質と非放射性元素の混在によるものと思われる。一部の例では、少量のもともとの放射性元素が残存しているためであり、この場合「誘導」放射線は恒久的である。また別の例では、ウランX、トリウムXのような崩壊産物のひとつが沈澱物質に引きこまれ、一時的ないし「偽性」放射能を呈するものである。いずれの場合も、放射線のもともとの性質は変化しない。放射性誘導に帰せられてきた現象のあるものは、再検討すれば既存の放射性元素からの新たな崩壊物質によるものであることがわかるであろう。

### その他の結果

非常に多くの物質について研究した結果、多くの検討課題が残っている。鉱物から、既知の3つの放射性元素とは異なる化学的性質を持ち、明らかな恒久的放射能をもつ新たな放射性元素が分離されている可能性がある。しかし残念ながら、多くの例において、有意の実際的な判断基準、すなわち放射線の性質やエマナチオンの有無などについて調べられていない。この場合、化学的性質はあまり有用ではない。新元素が存在したとしても、必ずしも化学分析やスペクトル分析で検出できるほど量が多くないからである。従って、Hoffmann & Strauss、および Giesel が記載した放射性鉛は、明らかな恒久的放射能を持つことが示されなければ、新たな元素と見なすことはできない。

これに関連して、ポロニウム（放射性ビスマス）が新

元素か否かという点は大いに興味のあるところである。Mme. Curie により発見されたポロニウムは、恒久的な放射性物質ではなく、その放射能は経時に緩徐に減衰する。その論文の主張するところでは、ポロニウムは閃ウラン鉱に存在する放射性元素の1つの崩壊産物と見なされる。しかし最近 Marckwald は、閃ウラン鉱の電気分解により Curie の発見したポロニウムに非常に良く似た放射性物質を得た (Ber. der D. Chem. Gesel. pp.2285 & 4239, 1902)。これによるとこの物質の放射能は経時に減衰しないとのことで、もしこれが確認できれば、彼の物質が Mme. Curie の物質とは異なると言えるに十分な証拠となる。その一方、いずれの物質も  $\alpha$  線だけを放出し、この点においてこれらは他の放射性元素と大きく異なっている。Marckwald は、彼の物質をビスマスから分離することに成功し、その最新の論文ではビスマスを除去した物質は、化学的にテルリウムと区別できないという。放射能の恒久性が確認できれば、新たな放射性元素の存在が推論される。

ウランより重い元素が存在すれば、放射性である可能性が高い。化学分析の手段として放射能は非常に鋭敏であることから、このような元素は限りなく微量であっても検出できると思われる。従って、放射性元素の数は将来的に増加することが予想され、現在知られている少量の3つの元素以上の量となろう。このような元素の探索手段として、純粋な化学的分析は役に立たない。主たる判断基準は放射線の恒久性、その明らかな特性、エマナチオンや崩壊産物の有無である。

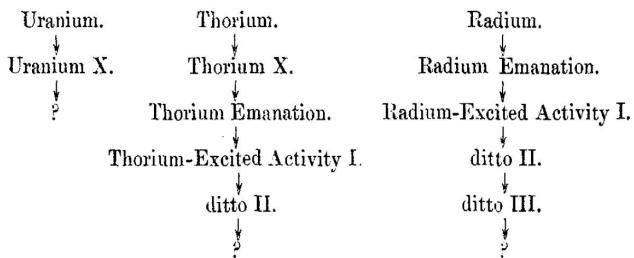
## 6. 放射性変化と化学変化の関係

物質の変化率が物質の量に比例するという放射性変化的法則は、单分子の化学反応にも当てはまる。従って放射性変化は、单一系のみが関与するようなものと考えられる。もし2つの系の相互作用が関係するような性質のものであれば、変化率は濃度に依存し、法則には体積の要素が関連するはずである。これは該当しない。放射能は元素の特異的な性質であることから、変化する系は化学的な原子しかありえず、放射性変化では单一の系が新たな系に加えて重い荷電粒子を生成することから、化学的な原子は崩壊せざるを得ない。

放射性元素は、すべての元素の中でも最も大きな原子量を有している。実際これが唯一の共通な化学的特徴ともいえる。原子の崩壊と水素原子と同程度の質量の荷電粒子の放出は、その後に以前よりも軽く、もともとの元素とは大きく異なる化学的、物理的性質をもつ新しい系を残す。崩壊過程は、いったん始まると各段階をそれぞれ一定の速度で進んでゆく。各段階で1つ以上の  $\alpha$  線が放出され、最後の段階に達すると  $\beta$  線すなわち電子が放出される。もともとの原子から放射線が放出された後に残り、限られた時間のみ存在して継続的にさらに変化してゆくこのような数多くの原子の

破片、あるいは新しい原子には、特別な名称を与えることが適當と思える。その主な特徴はその不安定性である。このため、ある程度の量が蓄積することがなく、通常の方法では検出が難しい。しかしその一方で、不安定性とそれに伴う光線放出は検出手段を提供することになる。我々はこれを目的として、metabolon という言葉を提唱する。

次表には、現在知られている 3 つの放射性元素の崩壊により生成される metabolon を示す。



訳注：現在の知識で言えば、Uranium X, Thorium X はそれぞれトリウム (Th), ラジウム (Ra) の同位体、Thorium Emanation, Radium Emanation はラドン (Rn) の同位体。? で示される最終生成物は鉛 (Pb) である。

3 つの疑問符は、それぞれ未知の最終産物である。放射性元素の原子は、metabolon と原子の間にいわば共通の土台を形成し、両者の特性を兼ね備えている。従って、これらは崩壊してゆくが、その速度は非常に遅いので化学的に分析できる程度に十分な量が蓄積する。ラジウムの崩壊速度は、トリウム、ウランにくらべておそらく 100 万倍も速いので、天然鉱石中のラジウムが非常に微量であることを説明しうる。実際、あらゆる考察から、ラジウム原子は鉱石中に存在する他の元素のひとつの中によって生じたという意味で、metabolon でもあると言える。例えばその「寿命」を推定すると、ラジウムのそれは数千年に満たない (7 節参照)。この点については我々の一人が研究中で、詳細については後報とする。

現在のところ、1 つの原子あるいは metabolon が、1 回の変化で複数の新たな metabolon を生成するという証拠はない。また 1 つのトリウム原子から、いくつのトリウム X の metabolon が生成されるのか、いくつの粒子あるいは「光線」が放出されるのか、知る術はない。従って、自然の原則を理解すれば重大な過ちを犯すことはないということから、1 つの原子あるいは metabolon は 1 つの新しい metabolon あるいは原子、1 つの「光線」を発生すると仮定するのが最も簡単である。

## 7. 放射性変化のエネルギー、化学原子のエネルギー

複雑な物質における化学的な原子の位置づけは、いまや実験的に得られるが、放射性変化と化学変化のエネルギーの比較によって最も明らかとなる。任意の量の

放射性元素が完全に変化する際に放出するエネルギー量のオーダーは、いくつかの異なる方法で知ることができ、その結果は非常に良い一致を見ている。最も直接的な方法は、放出された粒子のエネルギーと原子の総数から求める方法である。1 個の原子が変化する際、「光線」を出さないことはあり得ないので、この方法により放出される総エネルギーの最小値を推定することができる。一方、1 個の放射性元素の原子が完全に放出粒子に分解されたとすると、生成物質の質量が原子の質量に等しい仮定すれば、多く見積もっても 200 個以上の粒子を放出することはない。このことから、最大値を推定することができる。 $\alpha$  線は、放射線の総エネルギーの大きな部分を占めるので、これだけを考えれば良い。

$m$ : 放出される粒子の質量

$v$ : その速度

$e$ : その電荷

とするとき、ラジウムの  $\alpha$  線については

$$v = 2.5 \times 10^9$$

$$\frac{e}{m} = 6 \times 10^3$$

粒子の運動エネルギーは

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\frac{m}{e}v^2e = 5 \times 10^{14}e$$

J. J. Thomson によれば、

$$e = 6 \times 10^{-10} \text{ ES 単位} = 2 \times 10^{-20} \text{ 電磁単位}$$

従って、各粒子の運動エネルギー =  $10^{-5} \text{ erg}$ 。ラジウム 1g 当りの原子の数を  $10^{20}$  とすれば、ラジウムから放出される光線のエネルギーは、各原子が 1 つの光線を放出するとして  $10^{15} \text{ erg} = 2.4 \times 10^7 \text{ g} \cdot \text{cal}$ 。5 段階連続の崩壊過程が知られており、各段階で少なくとも 1 つの光線が放出される。従って、1g のラジウムの崩壊による総エネルギーは、 $10^8 \text{ g} \cdot \text{cal}$  を下ることはなく、 $10^9 \sim 10^{10} \text{ g} \cdot \text{cal}$  であろう。放出されるエネルギーは、必ずしも崩壊エネルギーの全てではなく、そのごく一部かもしれない。従って、1g 当り  $10^8 \text{ g} \cdot \text{cal}$  という数字は、ラジウムの放射性変化のエネルギーの最小限の推定値として安全に受け入れられるものである。水素と酸素の結合は、水 1g 当り約  $4 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{cal}$  のエネルギーを解放し、この反応は既知の化学反応のどれよりも多くの単位質量当たりのエネルギーを放出する。従って、放射性変化のエネルギーは少なくともこの 20,000 倍であり、既知の分子変化の 100 万倍にもなり得る。

ここで、エネルギーが放出される速度、これに伴う放射性元素の寿命を考えることができる。ラジウム 1g から 1 秒間に解放される総エネルギー量は、生成されるイオンの総量と、1 つのイオンの生成に必要なエネ

ルギーから求めることができる。固体塩の場合、放射線の多くの部分が物質に吸収されるが、エマナチオンの放射線によって生成されるイオンを求める、ラジウムの総照射線量に対するエマナチオンの比率を求ることでこの困難をかなり回避できる。この場合、光線のほとんどは空気から生成されるイオンに吸収される。実験的に、空気を満たした大きなシリンダー内でウランの1,000倍の放射能を持つラジウム1gからのエマナチオンの最大電流は、 $1.65 \times 10^{-8}$  電磁単位であった。 $e=2 \times 10^{-20}$  とすると、毎秒生成されるイオン数は $8.2 \times 10^{11}$  で、このイオンは放出された粒子がその経路上で気体と衝突して発生する。Townsendは(Phil Mag. vol. i, 1901), イオンの衝突実験により、イオンを生成するために必要な最小エネルギーが $10^{-11}$  ergであることを見いだしている。純粋なラジウムの放射能がウランの100万倍であることを考えると、1gの純粋なラジウムから生じるエマナチオンが1秒間に放出するエネルギーは8,200ergである。固体のラジウム化合物では、これは総エネルギーの約0.4に相当する。すなわち、

$$\begin{aligned} & 2 \times 10^4 \text{ erg / 秒} \\ & 6.3 \times 10^{-11} \text{ erg / 年} \\ & 15,000 \text{ g} \cdot \text{cal / 年} \end{aligned}$$

この数字は、イオンを生成するのに必要なエネルギーのみを考えた低めの見積であり、総エネルギーの小部分でしかない。

すべての放射性元素の $\alpha$ 線放射の性質はきわめて類似していることから、トリウムやウランの弱い放射線は、これらの元素がラジウムよりも緩徐に崩壊して発生しているものと推定することは合理的であろう。この場合、放射線のエネルギーはラジウムの約 $10^{-6}$ であり、 $0.015 \text{ g} \cdot \text{cal / 年}$ となる。

この数字を放射線の総エネルギーで割れば、 $2.4 \times 10^7 \text{ g} \cdot \text{cal}$ となり、放射性変化をおこすウランあるいはトリウムの最大推定値として $6 \times 10^{-10}$ を得る。つまり100万年の間にこれらの元素1gのうち変化するのは1mg以下である。1つの粒子が1回の変化で1つだけ光線を出すという仮定に基づく、この最小限の推定値では、ラジウムの「寿命」は数千年以上ではありえない。こ

れより多くの光線を出す場合は、それに応じて寿命は長くなるが、最大でもこの50倍以上にはなり得ない。従って、鉱物中のラジウムは、鉱物と同じ期間存在したものではなく、放射性変化によって恒常に持続的に生成されたものであることは明らかである。

最後に、1gの放射性元素から1秒間に生成される「光線」の数は次のように推定される。各「光線」のエネルギーは、 $10^{-5} \text{ erg} = 2.4 \times 10^{-13} \text{ g} \cdot \text{cal}$ であるから、1gのウランから毎年 $6 \times 10^{-10}$ の光線が放出される。これは毎秒あたり約2,000である。1mgのウランが毎秒放出する $\alpha$ 線は、おそらく電気的な方法により検出できる範囲にある。従って、この実験方法は1個の原子の崩壊を検出することにほぼ等しいが、天秤によって検出できるウラン原子は $10^4$ を下らない。

このような推定は、放射線のエネルギーに関するもので、放射性変化全体のものではないと指摘されている。後者は原子の内部エネルギーの一部であり、生成物の内部エネルギーは未知だからである。このような考察から、原子の潜在エネルギーは、通常の化学変化で解放されるエネルギーにくらべて莫大なものであるという結論に達する。放射性元素は、その化学的、物理的性質については他の元素と変わることはない。化学的には、周期表で近傍にある非放射性元素に類似する一方、その放射能に関連する共通の化学的特徴は有しない。従って、この莫大な蓄積エネルギーが放射性元素だけのものと考える理由はない。放射性変化がないためにその存在が明らかとならないだけで、原子エネルギー全般について同じく莫大なものであろう。このエネルギーの存在が、非常に多岐にわたる条件下における元素の安定性、放射能の保存の背景にある。宇宙物理学についてもこれを考慮しなくてはならない。例えば太陽エネルギーの維持についても、太陽の構成元素の内部エネルギーが利用可能である、すなわち原子下レベルの変化が進行中であるとすれば、その説明に根本的な困難はない。Norman Lockyer卿は、太陽の温度は反応の結果ではなく原因であるとしているものの、スペクトル解析をこのような考え方に基づいて解釈している点は興味深い(Inorganic Evolution, 1900)。