

## 放射線・放射能の発見から原爆開発のはじまりまで

今中 哲二

京都大学複合原子力科学研究所

2011年に福島原発事故が起きてから、放射能、放射線、原子力について一般の方に話をする機会が増えた。「原発事故によってもたらされた放射能汚染に向かいあうには、まずはベクレルとかシーベルトといったコトバを理解してなじんでもらう必要がある」といつも言っているものの、“なじみのないことになじんでもらう”のは、なかなか大変である。放射線、放射能について全く知られていなかった頃からはじめて、私たちがどのように知識を積み重ねていったか知って頂くことが“なじみのないことになじんでもらう”のに役に立つだろうと考えたのが、本稿にとりかかった動機である。原論文はほとんどインターネットにオープンでアップされおり、URLを探し出して文献リストに入れておいた。原子、原子核、電子、アルファ線、ベータ線、ガンマ線、核分裂といったことについて、知識の由来を深く知りたいと思われている方に役立つだろうと思っている。なお、本稿に出てくるエピソード的な話の大部分は、リチャード・ローズ著「原子爆弾の誕生(上)(下)」紀伊國屋書店1995年からの引用である。

### 放射線・放射能の発見

1895年、ドイツの物理学者レントゲンは、真空管（クルックス管）に高電圧をかけ、陰極線によってガラス壁で蛍光を発生させる実験をやっていた。あるとき、真空管全体を黒い紙で覆ってあるのに、傍らの蛍光板が光っているのに気がついた。すなわち、透過力の強い何か黒い紙を通して蛍光板を光らせていた。蛍光板の前に手のひらを置くと骨の形が透けて写ったりした。レントゲンはその何かを「X線」と名付けて論文に発表した[1]。レントゲンは続報で、X線が通った空気は一時的に通電性をもつようになると報告している[2]。

1896年、燐光の研究をしていたフランスの物理化学者ベクレルは、X線の発見に刺激され、ウラン化合物（硫酸ウラニルカリウム）に太陽光を当てて、X線のようなものが発生するかどうかを調べる実験をはじめた。あるとき、天気が良くないので、ウラン化合物と写真乾板を重ねて机の引き出しにしまっておいた。数日後、取り出して現像してみると乾板は強く感光していた。ベクレルは、ウランという物質からX線のように写真乾板を感光させる何か放出されていることを報告した[3]。

一方、英国の物理学者トムソンは1897年、陰極線に磁場をかけて偏向させる実験から、陰極線の正体が負の電荷を持った微粒子、すなわち電子であることを明らかにしている[4]。

ベクレルの発見を引き継いで“ベクレル線”の研究を進めたのは、パリで研究生生活をはじめたばかりのポーランド人マリー・キュリーだった。夫のピエール・キュリーは物理学者で、空気中においた電極板の間をベクレル線が通過する際に発生する微弱電流を測定する装置を製作した。キュリー夫妻は、その装置を使ってさまざまな物質の放射活性を測定し、ウラン化合物と同じく、トリウム化合物もベクレル線を放出していることを見つけた[5]。（放射能 radioactivity という言葉はキュリー夫妻が使い始めた。）

キュリー夫妻が注目したのは、金属ウランの放射活性より、ウラン鉱石の方がかなり大きいことだった。ウラン鉱石の中に、ウラン以外の放射活性物質が含まれていると考えたキュリー夫妻は、数トンのウラン鉱石（ピッチブレンド）を処理して、放射活性の強い2種類の微量物質を抽出し、ポロニウムとラジウムと名前をつけて発表した（1998年）[6]。

キュリー夫妻や英国で同じくベクレル線の研究をしていた物理学者ラザフォードらは、ベクレル線には2種類の放射線が含まれていることに気がついていた。ラザフォードは、アルミ箔などで容易に吸収され透過力の弱い放射線を“アルファ線”、アルミ箔ではあまり吸収されない放射線を“ベータ線”と名付けた。ベータ線は、磁場をかけると陰極線と同じように偏向することから負の電荷をもつ電子であると考えられた[7]。

1900年、フランスの化学者ヴィラードは、ラジウムのベクレル線から、薄い鉛でアルファ線を除き、さらに磁場を通してベータ線を除いた後にも、直進性で透過力のある放射線が残っていることを発見した[8]。1903年の論文でラザフォードは、この放射線を“ガンマ線”と名付けた。同じ論文でラザフォードは、強い磁場を用いた実験で、アルファ線がベータ線とは反対方向に曲がること、つまり正の電荷をもっていることを報告している[9]。

## 原子・原子核の研究のはじまり

19世紀最後の5年余りの間に、X線、放射能、電子、アルファ線、ベータ線、ガンマ線と重要な発見が相次いだ。当時、すべての物質は元素ならびに元素の組み合わせで出来ていて、元素それぞれには特有な原子が存在しているという知見は確立されていた。原子の相対的な重さ、すなわち水素原子の重さを1としたときの他の原子の重さ（原子量）の測定も行われており、ロシアの化学者メンデレーエフは1869年、当時発見されていた63個の元素を、原子量の順に元素を並べて「周期表」を発表している[10]。

放射線が原子から放出されていることは明らかだったが、どのようなメカニズムで放射線が発生するのかはミステリーであった。放射能ならびに放射線の正体についての思索と実験を通じて、原子はそれまで考えられていたように不変ではないことが明らかになって行く。ラザフォードとソディは1903年の総説で、放射能、放射線に関する知見に基づき、“原子の放射性崩壊”という概念を提唱している[11]。つまり、原子が別の物質（元素）の原子に変化する際に放射線が放出され、放射活性の強さは元の原子の量（数）に比例する。新たに出来た原子が放射性であれば、子が孫になるように、次の放射性崩壊を生じる。ウランやトリウムといった寿命の長い放射性物質は、自然界の中でそのような崩壊系列を形成している。

アルファ線の正体をはっきりするまでには少し時間がかかった。アルファ線は、重さが水素原子の約4倍で、正の電荷が2単位なので、ラザフォードらは正に帯電したヘリウム原子であろうと考えていた。1909年の決め手となった実験では、アルファ線をガラス管に集めて発光スペクトルの分析を行い、ヘリウムそのものであることが確認された[12]。

放射能、放射線の正体が少しずつ明らかになるにつれ、放射線は原子の構造を調べるためのツール（道具）としても用いられるようになった。最も画期的な成果を上げたのは、金箔にアルファ線を照射しその散乱方向によって原子の構造を調べた1911年のラザフォードらの実験である[13]。原子は電氣的に中性の粒子であり、負の電荷を持つ電子と、電子の数と同量の正の電荷が含まれていると考えられていたが、どのような構造であるかは実証されていなかった。電子の発

見者であるトムソンは、正の電荷をもつ球形の基質（素地）の中に電子が点々と存在している“ぶどうパン”原子モデルを提唱していた[14]。ぶどうパンモデルのように、原子の中に万遍なく電荷が分布している場合には、電子に比べてはるかに重たいアルファ線が大きく散乱することはないと予測された。ところが実験結果は、金箔に照射したアルファ線の中には散乱して跳ね返ってくるものが観測され、原子質量の大部分と正の電荷は原子の中心部に集まって核のように存在していると解釈された。“原子核”の発見である。ラザフォードは、正の電荷をもつ原子核のまわりを、多数の電子が回っているという原子モデルを提案し、論文では1904年に長岡半太郎が提案した“土星型”モデル[15]にも言及している。

ラザフォードによる原子モデルを発展させたのが、デンマークの理論物理学者ボーアだった。1913年の論文でボーアは、元素に特有な発光スペクトルを説明するために、各電子は「跳び跳びの電子軌道」に入っているという概念を提唱した[16]。中心の原子核には、周期表の番号（原子番号）と同じだけの正の電荷があり、電氣的に中性の原子では、同じ数の電子が原子核の回りの跳び跳びの軌道に入っている。光や熱で原子がエネルギーを受けると、電子が軌道の間を遷移してある決まったエネルギーの光を吸収したり放出したりするという原子モデルである。ボーアの原子モデルは、それまで不明だった発光スペクトルのメカニズムを水素原子についてうまく説明できた。

周期表の原子番号を決定しているのは原子核の正電荷の数であるというボーアの原子モデルを実証したのは、ラザフォードの弟子のモーズリーだった。モーズリーは、各元素に特有なエネルギーを示すX線の研究から、原子番号とは、その元素の原子核がもっている正電荷の数であることを明らかにした[17]。

原子核の正電荷の正体は何だろうか。それまでの実験から、水素の原子核と同じものであろうと予測されていたが、それを実証したのもラザフォードであった。彼は1919年、窒素ガスにアルファ線を照射して、水素の原子核と考えられる粒子が発生するのを観察した[18]。この実験は、最初の人工的な核変換実験として知られている、次のような反応を観察したものだ。  $^{14}\text{N} + \alpha \rightarrow ^{17}\text{O} + \text{p}$ 。pは陽子（プロトン）と名付けられ、原子核の正電荷を構成する粒子として認知されることになる。

原子核についての残る問題は、原子量と原子番号との違いをどう説明するかであった。1920年ラザフォードは、原子核には陽子と同じ質量をもち電氣的には中性の粒子が含まれているという仮説を提唱している。電荷をもたない中性子を観察することは困難だったが、1932年、ラザフォードの弟子のチャドウィックが間接的な方法でそれを成し遂げた。それまでに、アルファ線をベリリウムにあてると正体不明の粒子が発生し“ベリリウム線”と呼ばれていた。チャドウィックは、ベリリウム線をパラフィンに当てて、はじき飛ばされて出てくる陽子を観察した。その陽子の運動エネルギーを調べて、ベリリウム線が陽子と同じ重さで電荷のない粒子、つまり中性子であることを確認した[19]。

中性子の発見に20年ほど先立つ1913年、ウラン系列やトリウム系列の放射性崩壊の研究をしていたポーランドの化学者ファヤンスとイギリスの化学者ソディは、一連の放射性物質の中に、重さ（原子量）が異なるものの化学的に分離できず周期表で同じ場所に位置するものがあることをほぼ同時に別々に報告している[20,21]。そうした放射性物質をソディは、周期表の同じ位置（元素）にありながら原子量が異なるという意味でし、“同位体 (isotopes)” と名付けた[22]。

ファヤンスやソディと同じ頃、電子の発見者であるトムソンは、真空管の中でネオンの正イオンを磁場で偏向させると2つに分離すること、つまり、ネオンという元素に原子量20のネオンと原子量22のネオンという“安定同位体”の存在を発見した[23]。トムソンの弟子のアストンは、電場と磁場を用いて荷電粒子を分離する質量分析の技術を発展させ、塩素や水銀などの元素が安定同位体の混合物であることを明らかにした[24]。

中性子の発見に基づき、同位体とは「原子核中の陽子の数が同じで中性子の数が異なるもの」と判明した。レントゲンによるX線の発見から40年近くを経て、放射能、放射線の正体、原子と原子核の構造の概略が明らかになった。

## 核分裂の発見

中性子は電荷をもたないので、容易に原子核に吸収されて新たな同位元素ができる。中性子の発見によって、放射能の研究は一気に広がった。1934年、イタリアの物理学者フェルミのグループは、さまざまな元素に中性子をあてて新しい放射性同位元素を作る実験をやっていた。あるとき、同じ実験を大理石の台の上でやった場合と木製の台の上でやった場合で生成物の放射活性が異なることに気づいた。木製の方が大きかったのだが理由を考えめぐっていたとき、フェルミはふと思いついて、線源とターゲットの間にパラフィンを置いてみたら、放射活性がはるかに増加した。水を置いてみても同じことが起きた。アルファ線でベリリウムを叩いて出てくる出来たての中性子は、高速で大きなエネルギーを持っているが、水素を含んでいるような物質と衝突すると、エネルギーが落ちて低速になる。フェルミらは、こうした低速中性子の方が中性子反応を起こしやすいことを発見した[25]。

イタリアでは1922年、ムッソリーニが首相の座に着いて、1929年からファシスト党独裁体制となった。一方ドイツでは、1933年、ヒトラーが政権につくと国会議事堂炎上事件をきっかけにナチスへの『全権委任法』が作られナチス党独裁体制が作られた。ムッソリーニとヒトラーとの仲は、当初は良好ではなかったが、1936年からのスペイン内戦、1938年のミュンヘン会談などを経て盟友関係となり、イタリアでもユダヤ人迫害が始まった。フェルミは夫人がユダヤ人だったので、1938年のノーベル賞受賞式の機会に一家は米国へ亡命した。

ドイツでは、化学者のハーンと物理学者のマイトナーがウランに中性子を当てて新たな同位体を作る実験をしていた。ウランは自然界で原子番号のもっとも大きな元素であり、うまくすればウランより大きな元素、超ウラン元素を発見できる可能性があった。マイトナーはユダヤ人だったがオーストリア国籍だったのでユダヤ人排斥法の適用を免れていた。しかし、1938年3月のオーストリア併合にともない身に危険が迫ってきたのでスウェーデンに亡命した。

ハーンはベルリンで、ウランに中性子を当てた後にアルファ崩壊を2回起こして生成するはずのラジウムの分離実験をやっていたが、奇妙なことに悩まされていた。「ラジウム」は他の元素とは容易に分離できたもののバリウムと分離できなかった。ハーンは結局、生成したものはラジウムではなくバリウムであるという論文を1938年暮れに投稿する[26]。マイトナーは、スウェーデンでのクリスマス休暇先でハーンからの論文草稿を受け取った。そのときマイトナーのところにはたまたま、甥でデンマークのボーアのところで研究をしていた物理学者のフリッシュがクリスマスと一緒に過ごしに来ていた。ハーンの発見をめぐっての二人の議論の中から「原子核の分裂」という着想が生まれた。クリスマス休暇からデンマークに戻ったフリッシュは、1939年

1月3日にボーアに会って、ハーンらの実験とウラン原子核分裂説を説明したところ、「私らはなんてバカだったんだ!」と言ってボーアはすぐに理解したという。

「ウランの照射によって生成されるアルカリ土類の同位元素とその振る舞い」と題するハーンの論文は1939年1月6日にドイツの専門誌に出版された[26]。「中性子によるウランの崩壊：新たなタイプの核反応」と題するマイトナーの短報[27]は2月11日に、「中性子照射による重い原子核の分裂に関する物理的証拠」と題するフリッシュの短報[28]は2月18日にどちらも英国誌 *NATURE* に発表された。マイトナーは、92個の陽子をもつウランの原子核が2つに割れたら、電気的な反発力による断片の運動エネルギーは約2億電子ボルトとなり大変なエネルギーが解放されるだろうと見積もっている。また、フリッシュは、電離箱中のウランに中性子を当てて、核分裂片の電離作用によりアルファ線より10倍以上大きな信号が発生することで核分裂の現象を確認している。しかし、いずれの論文でも、2次中性子の発生や連鎖反応についての議論はない。

## 核分裂連鎖反応の研究

フリッシュから核分裂説を聞いた4日後の1939年1月7日、ボーアはベルギーの物理学者ローゼンフェルトと一緒に船で米国へ出発し16日にニューヨークへ到着した。船中でボーアは核分裂発見の話をもつローゼンフェルトに行き、ローゼンフェルトはニューヨークに着いた日の夕方にプリンストンでの勉強会で核分裂発見の報告をした。そして、核分裂発見の話は全米に広まった。

ウラン核分裂のニュース以前から、中性子による核分裂連鎖反応の可能性を考えていたのは、ハンガリー生まれの物理学者シラードだった。シラードは英国に亡命した1933年9月、「核変換によってエネルギーを手にしよというものは月影について語るようなものだ」というラザフォードの講演記事に反発して、「中性子を衝突させて、2個の中性子が飛び出すような反応が見つかれば、ある大きさの塊で連鎖反応を起こすことが出来る」というアイデアを思いついたと回顧している[29]。

核分裂連鎖反応が起きるかどうかは、中性子とウランとの核分裂反応の起こし易さを示す“断面積”と核分裂を起こした際に新たに中性子がいくつ放出されるかという“2次中性子発生数”にかかっている。理論的には、原子核中の中性子対陽子比の大きなウラン原子核が割れると、中性子対陽子の少し小さな原子核になるので、余分な中性子が放出されるはずである。

英国から米国に移っていたシラードはウラン核分裂の話を知るとただちに中性子発生数の実験を始めた。イタリアからニューヨークに移ってきたばかりの中性子の専門家フェルミも違う方法で実験をはじめた。シラードらとフェルミらの実験結果はともに1939年4月15日の *Physical Review* 誌に発表され、どちらも核分裂当り約2個という結論だった[30,31]。一方、キュリー夫妻の娘婿でフランスの物理学者ジョリオ・キュリーも、マイトナーらの論文を読んで核分裂連鎖反応の可能性を見抜き、2次中性子の実験をはじめ、1939年4月22日の *NATURE* 誌に核分裂当り3.5個という結果を発表した[32]。ジョリオ・キュリーの同僚のペランは、核分裂連鎖反応を実現するために必要なウラン量（いわゆる臨界量）の理論的な見積もりを行い天然ウラン40トンという値を報告している[33]。

フェルミとシラードは、核分裂にともなう中性子発生数の検証実験の延長として、天然ウラン

と普通の水(軽水)とを組み合わせることで連鎖反応を実現するための実験に共同で取り組みはじめた。核分裂で発生する高速中性子を軽水によって減速させ、核分裂しやすい低速中性子にして、次の核分裂を起こさせるというやり方である。1939年夏までに、水素による中性子の吸収が邪魔になって天然ウランと軽水の組み合わせでは連鎖反応の成立は難しいと判明した[34]。

1939年9月にボーアは核分裂に関するそれまでの知見と理論をまとめた総説を発表した[35]。その中でボーアは、ウランに対する核分裂断面積を低速中性子で2~3バーン、高速中性子では0.5バーンという見積もりを示している。そして、低速中性子による核分裂は同位体存在量が0.7%のウラン235によるもので、存在量99.3%のウラン238は低速中性子では核分裂を起こさないと述べている。この場合、ウラン235の低速中性子に対する核分裂断面積は300から400バーンという値になる。

“断面積”というのは、ある核反応の起こりやすさを“的の大きさ”、つまり原子核の投影面積として表したもので、1バーン=1×10<sup>-24</sup>平方cmである。核分裂断面積、散乱断面積、吸収断面積といったように核反応ごとに断面積値がある。

核分裂発見の情報は日本の物理学者にも程なく届いて居た。いち早く研究に取り組んだのは、理化学研究所の仁科芳雄のグループと京都帝大物理教室の荒川文策のグループだった。京都帝国大学の萩原徳太郎らはウランの核分裂にともなう中性子発生数について2.6個という実験結果を1939年のうちに報告をしている[36]。また、理化学研の玉木英彦と皆川理は1939年から1940年にかけて核分裂についての総説を日本数学物理学会誌に発表している[37,38]。玉木らの論文には、連鎖反応の可能性についての考察はあるものの、原子爆弾についての言及はない。

## 原子爆弾開発のはじまり

シラードは、1933年に核分裂連鎖反応を着想したときから、ナチスドイツがそうした兵器を手にするのを恐れていた。核分裂の発見により「原子爆弾」の可能性が具体的にってきたことから、ドイツに先んじられることがないように手を打つべきだと考えはじめ、まず知り合いの物理学者らに核分裂に関する研究結果を発表しないよう説得をはじめた。また、旧知のアインシュタインを訪問し、ドイツに遅れをとらないよう米国政府も連鎖反応研究を進めるべきだとルーズベルト大統領に進言する工作をはじめた。

1939年9月1日、ナチスドイツがポーランドに侵攻すると、イギリス、フランスはドイツに宣戦布告し第2次大戦がはじまった。アジアでは2年前の1937年から日中戦争が始まっていた。米国はまだ参戦していなかったが、ルーズベルト大統領はイギリスや中国を積極的に支援する政策をとっていた。

アインシュタインの手紙[39]の日付は1939年8月2日であるが、仲介者ザクスが実際に大統領に手紙を渡したのは10月11日だった。大統領はザクスの話を聞いて、部下に検討するよう指示を出した。こうして「ウラン諮問委員会」が生まれた。

アインシュタインの手紙は、核分裂が発見されて人工的な連鎖反応に成功する可能性があること、うまくすれば爆弾に応用できるかも知れないこと、ウラン資源の確保が大事なこと、ドイツでも研究が進められているようだ、という内容だった。手紙を下書きしたのはシラードで「船に積んで爆発させれば港を破壊できる」と書かれているように、爆弾というより原子炉を爆発させるというイメージだった。

軍の技術者も参加したウラン諮問委員会は、爆弾については懐疑的だったが、とりあえず基礎研究を進める必要を認めて、フェルミが中心になって進めていた天然ウラン原子炉の研究に資金援助を決めた。フェルミとシラーは、水（軽水）をあきらめた次の中性子減速材候補として黒鉛に目を付けていた。ウラン諮問委員会の支援を得て天然ウランと黒鉛による核分裂連鎖反応の実験が進められた。

1938年のクリスマスにマイトナーと一緒に「核分裂」を着想したフリッシュは、第2次大戦が始まる直前にデンマークから英国のバーミンガムに移っていた。フリッシュは、低速中性子によって連鎖反応に成功したとしても、核反応の進行速度が遅いので爆弾にはならないことを理解していた。つまり、核分裂で発生した高速中性子が他の原子核と散乱を繰り返して低速になって次の核分裂を引き起こすまでに1ミリ秒かかると予測された。そのような速度だと、核分裂が十分進む前に装置が飛び散ってしまい、通常の爆弾と変わらない爆発で終わってしまう。

フリッシュは、ナチスを逃れてドイツからバーミンガムに来ていた物理学者パイエルスと一緒に連鎖反応に関する理論的検討をはじめた。そして、天然ウランからウラン235を分離し、ウラン235だけで高速中性子反応を行う場合のみ爆発的な連鎖反応が可能になると結論した。存在率が0.7%のウラン235を残りのウラン238から選り分けることはとんでもなく大変な作業になる。1940年3月に2人がまとめた「ウランの核連鎖反応に基づいた超爆弾の構築について」というタイトルの覚書では、約5kgのウラン235を用いた核分裂爆弾の爆発力はダイナマイト数1000トンに達するだろうと見積もっている[40]。

フリッシュ・パイエルス覚書を受け取った英国科学界の重鎮らは、この重大性を認識し、研究者を集めて MAUD 委員会と呼ばれる特別委員会を設置して超爆弾の可能性を検討した。超爆弾の実現可能性は、高速中性子に対するウラン235の断面積の値とウラン235の分離濃縮方法にかかっていた。1941年3月米国の研究者から断面積に関する新たなデータが伝えられてきた。そのデータはウラン235による超爆弾が十分に可能なものであることを示していた。中性子の発見者チャドウィックは、「1941年春のことを覚えている。あとき私は、核爆弾は単に可能だけでなく、避けられないものだと思った」と後に述べている。ウラン235の濃縮には「熱拡散法」と「ガス拡散法」が検討され、ガス拡散法が有望と考えられた。1941年7月にまとめられた MAUD 委員会報告[41]では、ウラン爆弾は実現可能であり、11kgのウラン材料を用いた爆弾の威力は TNT 火薬18キロトンに相当し、この戦争において決定的な結果をもたらすだろう、と述べられている。

ウラン爆弾が可能であるという MAUD 報告書は直ちに米国の科学研究開発庁 (OSRD) とに送られた。それまで米国政府としてはウラン爆弾計画には消極的で、米国科学アカデミー (NAS) が核分裂の利用に関して作成した2つの報告書では、連鎖反応のエネルギー源としての利用が優先されていた。MAUD 報告を踏まえて OSRD の責任者だったヴァネバー・ブッシュは、米国科学アカデミー (NAS) に対して新たな報告書を作成するよう要請した。1941年11月6日付けの NAS 第3報告書[42]では、ウラン235を用いた爆弾は可能であり、ウラン濃縮については「遠心分離法」と「気体拡散法」が「実際的な試験の段階に入りつつある」と述べていた。

ブッシュは11月27日に NAS 第3報告書をルーズベルト大統領に届けた。ブッシュはそれ以前の10月9日にもルーズベルトに会って英国の MAUD 報告について説明している。ルーズベルトがいつの段階で決定を下したかは定かでないが、この時期に米国の原爆開発は、「研究から

開発へ」と転換した。ブッシュは12月6日に関係する専門家をワシントンに集め、ウラン研究を再編し原爆開発に全力で取り組むことを伝えた。翌日の12月7日、日本軍の真珠湾攻撃により米国も戦争に参加することになる。

米国陸軍主導のマンハッタン計画が、原爆製造に向けて具体的に動き始めるのは1942年の夏だった。そして、その3年後の1945年8月6日に広島へ、9日に長崎へ原爆が投下されるにいたる。

## 文献

1. Wilhelm C Röntgen (1895) Ueber eine neue Art von Strahlen. Sitzungsberichten der Würzburger Physik.-medic. Gesellschaft pp. 137–147.

[http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/archivos\\_10/Uber\\_eine\\_neue\\_art\\_von\\_strahlen\\_ocr.pdf](http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/archivos_10/Uber_eine_neue_art_von_strahlen_ocr.pdf)

(英訳) <https://www.nature.com/physics/looking-back/roentgen/roentgen.pdf>

(邦訳) 木村豊 訳. 物理学古典論文叢書 7、pp7-11、東海大学出版会、1970.

(邦訳) 中崎昌雄 訳、中京大学教養論叢 第37巻第1号、1996年、117-124頁

[https://ci.nii.ac.jp/els/contentscinii\\_20180213145502.pdf?id=ART0007377539](https://ci.nii.ac.jp/els/contentscinii_20180213145502.pdf?id=ART0007377539)

2. Wilhelm C Röntgen (1896) Ueber Eine neue Art von Strahlen. 2. Sitzungsberichten der Würzburger Physik.-medic. Gesellschaft Würzburg, pp. 11–17.

[http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/archivos\\_10/Uber\\_eine\\_neue\\_art\\_von\\_strahlen\\_ocr.pdf](http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/archivos_10/Uber_eine_neue_art_von_strahlen_ocr.pdf)

(邦訳) 木村豊 訳. 物理学古典論文叢書 7、pp12-16、東海大学出版会、1970.

(邦訳) 中崎昌雄 訳、中京大学教養論叢 第37巻第1号、1996年、117-124頁

3. Henri Becquerel (1896) Sur les radiations émises par phosphorescence. Comptes Rendus. 122: 501–503.

<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k30780/f503.image.langEN>

(英訳) <http://web.lemoyne.edu/~giunta/becquerel.html>

(邦訳) 西尾成子 訳. 物理学古典論文叢書 7、pp43-45、東海大学出版会、1970.

(邦訳) 中崎昌雄 訳、中京大学教養論叢 第37巻第2号、1996年、53-55頁

[https://chukyo-u.repo.nii.ac.jp/?action=repository\\_uri&item\\_id=13220&file\\_id=20&file\\_no=1](https://chukyo-u.repo.nii.ac.jp/?action=repository_uri&item_id=13220&file_id=20&file_no=1)

4. Josef J Thomson (1897) Cathode Rays. The Electrician. 39: 104-109.

<https://books.google.co.jp/books?id=vBZbAAAAYAAJ&pg=PA104#v=onepage&q&f=false>

5. Marie Sklodowska-Curie (1898) Rayons émis par les composés de l'uranium et du thorium, Comptes Rendus. 126: 1101-1103.

[http://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Curie/Curie\\_pdf/CR1898\\_p1101.pdf](http://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Curie/Curie_pdf/CR1898_p1101.pdf)

(英訳) <https://www.ias.ac.in/article/fulltext/reso/006/03/0094-0096>

(邦訳) 西尾成子 訳. 物理学古典論文叢書 7、pp55-58、東海大学出版会、1970.

6. Pierre Curie, Marie Skłodowska-Curie (1898) Sur une substance nouvelle radioactive contenue dans la pechblende. Comptes Rendus. 127: 175-178

[http://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Curie/Curie\\_pdf/CR1898\\_p175\\_178.pdf](http://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Curie/Curie_pdf/CR1898_p175_178.pdf)

(邦訳) 西尾成子 訳. 物理学古典論文叢書 7、pp61-63、東海大学出版会、1970.

7. Earnest Rutherford (1899) Uranium Radiation and the Electrical Conduction Produced by It. Philosophical Magazine, ser. 5, pp109-163

<https://archive.org/details/londonedinburgh5471899lon/page/108>

<https://www.chemteam.info/Chem-History/Rutherford-Alpha&Beta.html>

8. Paul Villard (1900) Sur la Réflexion et la Réfraction des Rayons Cathodiques et des Rayons Déviés du Radium. Comptes Rendus, 130: 1010-1012.

<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3086n/f1010.item>

9. Earnest Rutherford (1903) The magnetic and electric deviation of the easily absorbed rays from radium, Philosophical Magazine, Series 6, vol. 5, pp177–187.

<https://archive.org/details/londonedinburgh651903lond/page/176>

10. Дмитрий И Менделеев (1869) Соотношение свойств с атомным весом элементов // Журнал Русского химического общества. Vol. I. pp 60—77.

<http://www.knigafund.ru/books/51872/read#page66>

11. Earnest Rutherford and F. Soddy (1903) Radioactive Change. Philosophical Magazine, Series 6, vol. 5, pp576–591.

<https://archive.org/details/londonedinburgh651903lond/page/576>

(邦訳) 萱沼和子 訳、古典論文叢書 7、pp125-141、東海大学出版会、1970.

12. Earnest Rutherford and Thomas Royds. The Nature of  $\alpha$  Particle from Radioactive Substances, Philosophical Magazine, (6), 17, 281-286 (1909).

<https://archive.org/details/londonedinburg6171909lond/page/280>

(邦訳) 萱沼和子 訳、古典論文叢書 7、pp167-172、東海大学出版会、1970.

13. Earnest Rutherford (1911) The Scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  Particles by Matter and the Structure of the Atom. Philosophical Magazine, Series 6, vol. 21, pp 669-688.

<https://archive.org/details/londonedinburg6211911lond/page/668>

<https://www.chemteam.info/Chem-History/Rutherford-1911/Rutherford-1911.html>

(邦訳) 辻哲夫 訳、古典論文叢書 9、pp197-118、東海大学出版会、1970.

14. Josef J Thomson (1904) On the Structure of the Atom: an Investigation of the Stability and Periods of Oscillation of a number of Corpuscles arranged at equal intervals around the Circumference of a Circle; with Application of the Results to the Theory of Atomic Structure. Philosophical Magazine, Ser 6, Vol 7, pp237-265.

<https://archive.org/details/londonedinburgh671904lond/page/n305>

15. Hantaro Nagaoka (1904) Kinetics of a System of Particles illustrating the Line and the Band Spectrum and the Phenomena of Radioactivity. Philosophical Magazine. Ser 6, Vol 7, pp 445-455.

<https://archive.org/details/londonedinburgh671904lond/page/444>

16. Niels Bohr (1913) On the Constitution of Atoms and Molecules. Philosophical Magazine. Ser 6, Vol 26, pp 1-25.

<https://archive.org/details/londonedinburg6261913lond/page/n11>

<http://web.ihep.su/dbserve/compas/src/bohr13/eng.pdf>

17. Henry Moseley (1913) The high-frequency spectra of the elements. Philosophical Magazine. Ser 6 Vol 26, pp1024–1034

<https://archive.org/stream/londonedinburg6261913lond#page/1024/mode/2up>

(邦訳) 辻哲夫 訳、古典論文叢書 9、pp145-155、東海大学出版会、1970.

18. Earnest Rutherford (1919) Collisions of alpha Particles with Light Atoms. IV. An Anomalous Effect in Nitrogen. Philosophical Magazine. Se 6th series, Vol 37, pp581-587.

<https://archive.org/details/londonedinburg6371919lond/page/580>

19. James Chadwick (1932) The Existence of a Neutron. Proc. Roy. Soc., A, 136, pp692-708.

<http://www.cloudylabs.fr/wp/wp-content/uploads/2014/06/The-existence-of-a-neutron-1932-Chadwick.pdf>

20. Kasimir Fajans (1913) Die radioaktiven Umwandlungen und das periodische System der Elemente. Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft, Nr. 46, pp422–439.

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/cber.19130460162>

(英文) <https://www.chemteam.info/Chem-History/Fajans-Isotope.html>

21. Frederick Soddy (1913a) The Radio Elements and the Periodic Law, Chem. News, Nr. 107, pp 97–99.

<https://archive.org/details/chemicalnewsjou107londuoft/page/96>

22. Frederick Soddy (1913b) Intra-atomic Charge. NATURE, No2301 Vol.92 399-400.

[https://archive.org/stream/paper-doi-10\\_1038\\_092399c0/paper-doi-10\\_1038\\_092399c0\\_djvu.txt](https://archive.org/stream/paper-doi-10_1038_092399c0/paper-doi-10_1038_092399c0_djvu.txt)

23. Josef J Thomson (1913) Rays of positive electricity. Proc Royal Soc A 89, pp1-20.

<https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rspa.1913.0057>

24. Francis Aston (1920) Isotopes and atomic weights. Nature 105, p617.

<https://www.chemteam.info/Chem-History/Aston-MassSpec.html>

25. Edoardo Amaldi, Oscar D'Agostino, Enrico Fermi, Bruno Pontecorvo, Franco Rasetti and Emilio Segre (1935) Artificial Radioactivity produced by Neutron Bombardment – II. Proc Royal Soc A 149:522-558.

<https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspa.1935.0080>

(邦訳) [https://www.jstage.jst.go.jp/article/subutsukaishi1927/9/8/9\\_8\\_372/\\_pdf/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/subutsukaishi1927/9/8/9_8_372/_pdf/-char/en)

26. Otto Hahn and Fritz Strassmann (1939). "Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle". Die Naturwissenschaften. 27 (1): 11–15

<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2FBF01488241.pdf>

<https://www.chemteam.info/Chem-History/Hahn-fission-1939a/Hahn-fission-1939a.html>

27. Lisa Meitner and Otto Frisch (1939) Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction. Nature, 143, 239-240.

[http://www.atomicarchive.com/Docs/Begin/Nature\\_Meitner.shtml](http://www.atomicarchive.com/Docs/Begin/Nature_Meitner.shtml)

28. Otto Frisch (1939) Physical Evidence for the Division of Heavy Nuclei under Neutron Bombardment. Nature (London), Volume 143, p. 276

<https://www.chemteam.info/Chem-History/Frisch-Fission-1939.html>

29. Spencer R Weart and Gertrud W Szilard (1978) Leo Szilard: His Version of Facts. MIT Press.

(邦訳) 伏見康治・伏見諭 訳、シラードの証言、みすず書房 1982 年

30. Leo Szilard and Walter H Zinn (1939) Instantaneous Emission of Fast Neutrons in the Interaction of Slow Neutrons with Uranium. Phys. Rev. 55, 799.

[https://library.ucsd.edu/dc/object/bb1469125g/\\_1.pdf](https://library.ucsd.edu/dc/object/bb1469125g/_1.pdf)

31. Herbert L Anderson, Enrico Fermi and Henry B Hanstein (1939) Production of Neutrons in Uranium Bombarded by Neutrons. Phys. Rev. 55, 797.

<https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.55.797.2>

32. Hans von Halban, Frederic Joliot-Curie and Lew Kowarski (1939) Number of Neutrons Liberated in the Nuclear Fission of Uranium. Nature 143:680.

<https://www.nature.com/articles/143680a0> (not open)

33. Francis Perrin (1939). Calcul relatif aux conditions eventuelles de transmutation en chaine de l'uranium".

Comptes Rendus. 208: 1394–6.

<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6238836c/f26.item>

34. Herbert L Anderson, Enrico Fermi, Loe Szilard (1939) Neutron Production and Absorption in Uranium. Physical Review, 56:284-286.

<https://library.ucsd.edu/dc/object/bb01380563>

35. Niels Bohr and John A Wheeler (1939) The Mechanism of Nuclear Fission. Phys. Rev. 56:426-450.

<https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.56.426>

36. Tokutaro Hagiwara (1939) Liberation of neutrons in the nuclear explosion of uranium irradiated by thermal neutrons The Review of Physical Chemistry of Japan. 13(3):145-150.

<https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/46555/1/rpcjpnv13fp145.pdf>

37. 玉木英彦、皆川理 (1939) 中性子衝撃に依る重い原子核の分裂. 日本数学物理学会誌、第 13 巻 4 号、pp277-293.

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/subutsukaishi1927/13/4/13\\_4\\_277/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/subutsukaishi1927/13/4/13_4_277/_pdf/-char/ja)

38. 皆川理、玉木英彦 (1940) 中性子衝撃に依る重い原子核の分裂 (II). 日本数学物理学会誌、第 14 巻 1 号、pp106-121.

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/subutsukaishi1927/14/1/14\\_1\\_106/\\_pdf/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/subutsukaishi1927/14/1/14_1_106/_pdf/-char/en)

39. Letter from Albert Einstein to President Franklin D. Roosevelt, 08/02/1939. Archival Research Catalog. National Archives

[https://web.archive.org/web/20130922132711/http://media.nara.gov/Public\\_Vaults/00762\\_.pdf](https://web.archive.org/web/20130922132711/http://media.nara.gov/Public_Vaults/00762_.pdf)

40. Otto Frisch and Rudolf Peierls (1940) The Frisch-Peierls Memorandum.

<https://web.stanford.edu/class/history5n/FPmemo.pdf>

(邦訳) 山崎正勝、日野川静枝. 「原爆はこうして開発された」資料 1. 青木書店 1997.

41. The MAUD Report, 1941 Report by MAUD Committee on the Use of Uranium for a Bomb

<http://www.atomicarchive.com/Docs/Begin/MAUD.shtml>

42. Report to the President of the National Academy of Sciences by the Academy Committee on Uranium. Nov 6, 1941.

[https://nsarchive2.gwu.edu/nukevault/ebb525-The-Atomic-Bomb-and-the-End-of-World-War-](https://nsarchive2.gwu.edu/nukevault/ebb525-The-Atomic-Bomb-and-the-End-of-World-War-II/documents/001b.pdf)

[II/documents/001b.pdf](https://nsarchive2.gwu.edu/nukevault/ebb525-The-Atomic-Bomb-and-the-End-of-World-War-II/documents/001b.pdf)

(邦訳：抜粋) 山崎正勝、日野川静枝. 「原爆はこうして開発された」資料 2. 青木書店 1997.