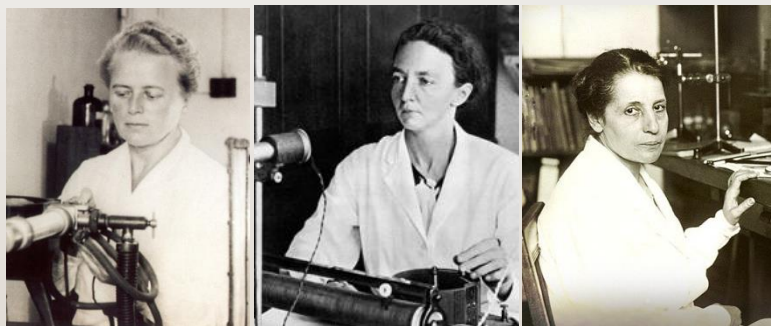


核分裂の発見

女性物理学者たちの貢献を振り返る



イムレ パージット

ヌ・タルナフスカ ホア キム・ガン

共著

スウェーデン イェーテボリ市 2018

核分裂の発見

女性物理学者たちの貢献を振り返る

イムレ・パージット

チャルマース工科大学物理学部原子核物理及びプラズマ物理部門

スウェーデン

ヌ・タルナフスカ ホア キム・ガン

クラコフ教育大学物理学研究所

ポーランド

共著



スウェーデン国 イェーテボリ市 西暦 2018 年

秋永則子 訳

核分裂の発見 – 女性物理学者たちの貢献を振り返る

ISBN 978-91-639-8498-3

©Imre Pázsit, 2018

イムレ・パージット (Imre Pázsit)

郵便宛先: Subatomär fysik och plasmafysik, Institutionen för fysik
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg

電話番号: +46(0)31-7723081

ウェブサイト: <http://www.nephy.chalmers.se/staff-pages/imre>

電子メール: imre@chalmers.se

ヌ・タルナフスカ ホア キム・ガン (Nhu-Tarnawska Hoa Kim-Ngan)

郵便宛先: Institute of Physics
Pedagogical University of Cracow
PL-30 084 Krakow, Poland

電話番号: +48(0)12-6627801

ファックス: +48(0)12-6372243

ウェブサイト: <http://www.up.krakow.pl>

電子メール: hoakimngan.nhu-tarnawska@up.krakow.pl

日本語翻訳:

秋永則子 (Noriko Johansson Akinaga)

電子メール: noak.at.norlanc@gmail.com

表紙デザイン:

マリア・パージット (Maria Pázsit)

前表紙の写真の女性たち:

イダ・タッケ・ノダック (Ida Tacke-Noddack)

イレース・ジョリオ・キュリー (Irène Joliot-Curie)

リーゼ・マイトナー (Lise Meitner)

後表紙のイラストレーション:

1938年のクリスマスにリーゼ・マイトナーとオットー・ハーンが核分裂のアイデアを思いついたクングエルヴでのスキーの散歩の場面。スウェーデン国営テレビのヤン・オロフ・ニルソンが2002年に作成した西スウェーデンでの核エネルギー研究の歴史に関する番組の一場面のイメージをマリア・パージットが描いたもの

原本: Upptäckten av Kärnklyvning – Kvinnliga Fysiker i backspegeln

ISBN 978-91-639-8497-6 Chalmers Reproservice ©Imre Pázsit, 2018

チャルマース・リプロサービス

イエーテボリ市、西暦2018年

目次

まえがき	iii
1. 核分裂の発見	1
1.1 核変換（1919 年～1935 年）	4
1.1.1 最初の核反応（1919 年）－アーネスト・ラザフォード	4
1.1.2 中性子の発見（1932 年）－ジェームズ・チャドウィック	11
1.1.3 連鎖反応のアイデア（1934 年）－レオ・シラード	14
1.1.4 中性子照射によるウラン反応（1934 年）－エンリコ・フェルミ	20
1.1.5 最初のウラン核分裂の仮説（1934 年 9 月）－イーダ・タッケ-ノダック	29
1.2 ウランとトリウムからの核分裂生成物の検出（1935 年～1938 年）	33
1.2.1 ペルリンの研究チーム（1935 年～1938 年）	33
－リーゼ・マイトナー、オットー・ハーンとフリッツ・シュトラスマン	33
1.2.2 半減期 3.5 時間の新たな核種の発見（1937 年～1938 年）	38
－イレース・ジョリオット・キュリーと P.サヴィッチ	38
1.2.3 バリウムが核分裂生成物の一つであることの発見（1938 年）	41
－オットー・ハーンとフリッツ・シュトラスマン	41
1.3 核分裂と連鎖反応（1938 年～1939 年）	47
1.3.1 核分裂の最初の解釈（1938 年のクリスマス）	47
－リーゼ・マイトナーとオットー・フリッシュ	47
1.3.2 連鎖反応（1938 年）	55
1.4 核分裂のノーベル賞	60
参考資料 1：諸種の核反応	67
参考資料 2：核分裂と連鎖反応	71
2. 核分裂の発見に重要な役割を果たした科学者たちの伝記	77
2.1 アーネスト・ラザフォード (Ernest Rutherford, 1871 年～1937 年)	77
2.2 レオ・シラード (Leó Szilárd, 1898 年～1964 年)	81
2.3 エンリコ・フェルミ (Enrico Fermi, 1901 年～1954 年)	85
2.4 イーダ・タッケ-ノダック (Ida Tacke-Noddack, 1896 年～1978 年)	90
2.5 イレース・ジョリオ・キュリー (Irene Joliot-Curie, 1897 年～1956 年)	93
2.6 オットー・ハーン (Otto Hahn, 1896 年～1978 年)	96
2.7 リーゼ・マイトナー (Lise Meitner, 1896 年～1978 年)	100

参考文献	105
ウェブリンク一覧	110
文中の図表と挿絵の一覧	111
伝記のウェブリンク一覧	113

まえがき

この本は、19 世紀後半から 20 世紀前半にかけての最も重要な発見の一つである核分裂(fission)現象の発見が科学史の中で辿った道を記述しています。何人もの優れた科学者たちがもう少しでこの発見に到達するところまで来ていながら種々の間違いのせいでその機会を逃してしまったという点で、この歴史はまことにサスペンスに満ちていると言えます。こうした出来事は実は科学の世界では稀ではなく、なぜ新たな事実にもっと早く気がつかなかったのか、と後に思うことがしばしばあります。それにしても核分裂の発見に至るまでの間違いの数は記録的で、そのことがこの歴史話をより興味深いものにしています。もし第二次世界大戦勃発の 5 年前に核反応、中でも核分裂の軍事利用への大きな可能性が既に理解されていたらどういうことになっていただろう、と考えるだけでもぞっとする思いです。

それだけではありません。これらの間違いについては他にも興味を惹く事柄があるので、これらの間違いの大半は当時著名だった男性の研究者たちが犯したものなのですが、それにも拘わらず彼らは科学研究に大いに貢献したとして、その多くにノーベル賞が授与されました。しかし、この発見に重要な貢献を成した女性の研究者たちの功績は男性の科学者たちと同等には認められませんでした。スウェーデンの見地から見て最も注目に値する女性研究者の一人は、オットー・ハーンとの共同研究の中で主導的な役割を担っていたと思われるリーゼ・マイトナーです。核分裂の発見によるノーベル賞はオットー・ハーンが単独で受賞し、彼女は共同の受賞者にはなりません。この本はまた、ウランに低速中性子を照射した自分の実験の結果をフェルミ自身は中性子の吸収とそれに伴う β 壊変過程による超ウラン元素の生成と解釈したのに対し、イーダ・タッケ・ノダックがフェルミはまず疑いなく核分裂を起こしたのに違いない、と 1934 年 9 月に誰よりも先に提唱した件も扱っています。この本はまた、1937 年の末にウラン照射の際に生成される半減期 3.5 時間の放射性物質のランタンを発見したイレヌ・ジョリオ・キュリーにも触れています。この時点ではランタンが核分裂生成物だったことは洞察されなかったのですが、この発見自体が核分裂

発見に向けての画期的な出来事だったと言えるからです。最終的には、1938 年 12 月から 1939 年 1 月の間に、リーゼ・マイトナーと彼女の甥のオットー・フリッシュがオットー・ハーンの実験が核分裂に成功していたことを洞察し、この過程で放出されるエネルギーの量を約 200MeV と見積もるとともに核分裂過程に正しい解釈を与えたのでした。

この本は、核分裂の発見をもたらした核物理学分野の重要な出来事をすべて記述するというより広い視野に立っています。1919 年にはアーネスト・ラザフォードが最初の核反応を起こすのに成功し、その反応の一部が化学反応とは比較にならないほどの高エネルギーを生成することに注目しました。ですが、ラザフォードは何故か核エネルギーの大規模な利用はただの夢で不可能に過ぎないものと信じ込んでいました。彼の懐疑的な態度に挑発されたレオ・シラードは、(ラザフォードが不可能と見做していた)核反応から正のエネルギー収支をもたらす問題の解決策を考えついて 1934 年この連鎖反応のアイデアに関する特許を取得しました。ですがシラードは、エネルギー生成と連鎖反応に適した反応生成物の双方を満たす反応を見つけることができず、核分裂発見のわずか数週間前に自分の特許を撤回したのでした。

この次の段階は、水素を含む物質にいわゆる低速中性子を照射した(これも 1934 年の)エンリコ・フェルミの実験でした。フェルミは核分裂を引き起こすことに成功していたのですが、幾つもの理由からこれに自分では気がつかなかったのです。というよりはむしろ、核分裂は不可能だと信じていた彼はその代わりに自分が超ウラン元素を生成したものと確信していたのでした。1938 年 12 月にはオットー・ハーンが、ランタンが核分裂生成物であるのと同様に、ウランに放射線を当てるとバリウムが生成されることに注目しました。彼はこの結果を当時ナチの迫害を逃れてドイツからスウェーデンに国外避難していたリーゼ・マイトナーに伝えました。今日ではよく知られているとおり、彼女は 1938 年のクリスマス・イブに甥のオットー・フリッシュとイエーテボリ市郊外のクングエルヴにあるノードレ川沿いでスキーの散歩をしていた時に、ウランの核が中性子によって二つに分裂したことを理解したのでした。そしてこの後の展開は皆さんもご存知の通りです。

興味ある読者の方々のために、核反応と核分裂に関する幾つかの基本的な事実を参考資料としてまとめました。また、何らかの形で核分裂の発見に貢献した科学者たちの伝記も記載されています。

この本はヌ・タルナフスカ ホア キム・ガンと私の共著で、初版は西暦 2007 年に英

語で出版、2008 年には再版が印刷されました(英語版の原題は”The discovery of nuclear fission: Women physicists in highlight”) [61]。英語版の主な資料としては次の文献を使用しました：CWP archive “*Contributions of 20th century Women to Physics*” - University of California 並びに Ruth Lewin Sime の “*Lise Meitner - A life in Physics*”, Berkeley-University of California Press, 1996.

スウェーデン語版は、英語版の内容を大幅に改訂かつ拡張し、二回にわたって出版されました。最初の暫定版は、著者の一人(私自身)がイエーテボリ王立学術協会(Kungl. Vetenskaps- och Vitterhets-Samhället i Göteborg)からの客員研究奨学金の支持を得てグレ・シュール・ロアン基金(The Grez-Sur-Loing Foundation)の施設に滞在した折に書き上げたもので、これに関しては同協会と基金に対し厚くお礼を申し上げます。

グレの施設で書き上げた暫定版はその後ビルゲル・カールソン教授(Prof. Birger Karlsson)に校閲と校正をしていただきました。著者たちは、几帳面さと語句の置き換えに関する多数の提案を通してカールソン先生に本文の質の改善をお手伝いいただいたことに深く感謝しています。

本書の日本語版はこのスウェーデン語改訂版からの翻訳で、西暦 2018 年にスウェーデンと日本との外交関係樹立が 150 周年を迎えることをきっかけにして出版されることになりました。著者たちは翻訳家の秋永則子さんの入念な仕事ぶりにも大変感謝しています。また、名古屋大学の山根義宏名誉教授と京都大学の代谷誠治名誉教授のお二人には日本語版の原稿の校閲と校正をしていただきましたことを心から感謝申し上げます。この日本語版の出版を、助成金を通してご支援くださったチャルマース工科大学のエネルギー学際研究分野にも厚くお礼を申し上げる次第です。

於イエーテボリ市、西暦 2018 年 10 月

イムレ・パージット

1. 核分裂の発見

核分裂の過程は幾つもの点で通常の反応の過程とは異っており、前世紀の数々の発見の中でもおそらく最も重要かつ思いがけないものの一つと考えられているのも当然と言えます。核分裂の過程では、化学反応に比べて膨大な量のエネルギーが放出されます。放出されたこのエネルギーは原子質量数 235 のウラン同位体(^{235}U)の核分裂の場合は約 20 億電子ボルト(200 メガ電子ボルト、200MeV と書きます)にも達します。この数値は、化学反応はもとより核分裂発見以前の核反応をも大幅に超えるものです。比較のために申しますと、炭素の原子一つを燃焼させる化学反応、つまり炭素の原子一つと酸素の原子二つが結合して気体の二酸化炭素(CO_2)を発生するときに放出されるエネルギーは約 4 eV です。一方で 1 グラムのウランの中のすべての原子を核分裂させた場合に解放されるエネルギーは約 $5 \times 10^{23} \text{MeV}$ で、これは高品質の石炭を 2.5 トン燃やした時に得られる熱エネルギーに相当します。つまり、ある重さのウランの核分裂は、それと同じ重さの石炭を燃やした時に比べて 250 万倍のエネルギーを生産するわけです。

核物理学の発端は、フランスの物理学者アンリ・ベクレル¹が 1896 年にウラン塩から発生される新しい種類の放射線を発見した出来事だったと言えます。彼はこの放射線を「ウラ

¹ アントワン・アンリ・ベクレル(Antoine Henri Becquerel, 1852~1908)はフランスの物理学者で 1903 年に「自発性放射能の発見を通しての並外れた功労を表彰するもの」としてノーベル物理学賞を受賞した(「放射能」という表現は 1898 年マリー・キュリーが最初に使用)。

ン放射線」と名付けました。この観察はその後マリー・キュリー²とピエール・キュリー³による放射性元素ポロニウムとラジウムの発見(1898 年)、アーネスト・ラザフォード⁴による α 線と β 線の発見、ポール・ヴィラール⁵の γ 線の発見、ラザフォードの原子核の存在の推論(1911 年)、そして最後にはボーア⁶の水素原子のモデル(1913 年)に至る 1900 年初期の多数の発見の先駆けとなりました。

1932 年までは原子核に関する知識はごく限られたものでした。当時、原子核は陽子(プロトン)と電子(エレクトロン)だけから成り立っているものと考えられていました。ですから、1932 年のジェームズ・チャドウィックによる中性子(ニュートロン)の発見は今日の原子核物理学の先駆けとなりました。しかしながら、この発見は、核反応の際に放出される最も重いものは α 粒子であるという当時の考え方を早急に変えるには至りませんでした。(α 粒子はヘリウムの原子核(^4He)で 2 個の陽子と 2 個の中性子から成り立っており、2 単位の陽電荷を持っています)。原子核から α 粒子が一つ放出されるとその核の原子番号 Z は 2 単位減少し、核は周期表上で二つ隣の別の元素に変化します。非常に軽い原子核である α 粒子を放出するのではなくて重い核が二つに分裂するのだ、ということには思い至らなかったのです。ですから、1932 年の核分裂の発見は、核反応の理解に大きな変化をもたらすととも

² マリー・キュリー(Marie Curie, 旧姓スクロドフスカ(Sklodowska), 1867~1934)はポーランド出身のフランスの研究者であり、1903 年に夫のピエール・キュリー(Pierre Curie, 1859-1906)と共に「アンリ・ベクレル教授が発見した放射線現象に関する共同の研究を通じて彼らが達成した並外れた功労を表彰する」ものとして、アンリ・ベクレルと共にノーベル物理学賞を受賞した。彼女は 1911 年「元素ポロニウム及びラジウムの発見、ラジウムの分離、また、この注目すべき元素の特性及び化合物の研究を通じて化学の発展に彼女がもたらした貢献を表彰する」ものとしてノーベル化学賞も受賞した。

³ ピエール・キュリー(Pierre Curie, 1859~1906)。脚注 2 を参照のこと。

⁴ 次の節を参照のこと。

⁵ ポール・ウルリッヒ・ヴィラール(Paul Ulrich Villard, 1860~1934)は 1900 年ウランの研究中に γ 線を発見したフランスの科学者である。(γ 線という表現はおそらく 1903 年にラザフォードが「三種の放射線(triplet)」 α 、 β と γ という表現を導入したことに由来するものと思われる)。

⁶ ニールス・ヘンリク・ダーヴィッド・ボーア(Niels Henrik David Bohr, 1885~1962)はデンマークの物理学者で「原子構造及び原子から放射される放射線の研究においての彼の貢献」によって 1922 年にノーベル物理学賞を受賞した。

に、新たな戦争手段の開発を可能としたことによって国際政治に重大な影響を及ぼすこととなりました。

この核分裂の発見により「重核の核分裂の発見の功労」をもって 1944 年にノーベル化学賞を授与されたのはオットー・ハーンだけでした。このことについては今日でも活発な議論が交わされています。この発見は彼が化学者のフリッツ・シュトラスマンと共にウランと中性子の核反応の過程でバリウムが生成されることを証明した事実に基づくものだからです。バリウムはウランの核が二つに分裂した結果として生成されたのです。

「二体核分裂」という表現はアメリカの生物学者ウィリアム・アーノルドが細菌の二つに分裂する過程を説明するのに使用したのがその起源です。「核分裂」という表現はリーゼ・マイトナーとオットー・フリッシュがハーンとシュトラスマンの実験結果をウランの核分裂過程というかたちで解釈して 1939 年 2 月に発表した論文の中に使用されたのが最初でした。

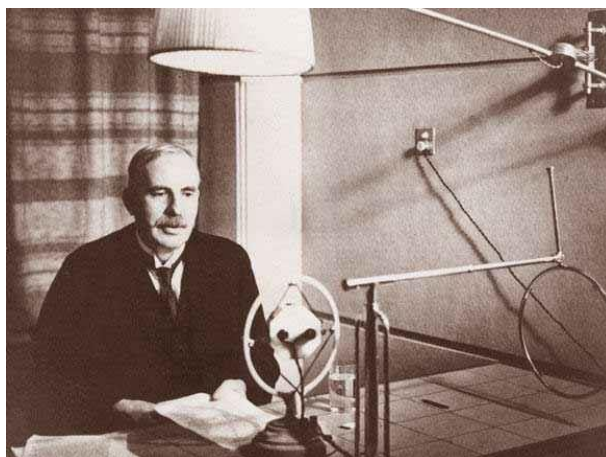
しかし、核分裂の発見への途は長く曲がりくねったものでした [1, 2]。成功の話ばかりではなく、幾つもの見逃しや間違いもありました。例えば、この分野で集中的な研究が行われた 1934 年から 1938 年までの 4 年間、先導的な立場にあった原子物理学者や核化学者たちは皆、ウランに中性子を照射した結果として生成されるのは超ウラン元素だけのはずだと強く思い込んでいたのです。エンリコ・フェルミのノーベル賞の動機は新たな超ウラン元素の創成と発見ということでした。1938 年 12 月 12 日のノーベル賞受賞講演において、フェルミは世界最初の二つの超ウラン元素 93 と 94 のことを自信に満ちて語ったものです。ですが僅か 10 日後の 1938 年 12 月 22 日にはハーンとシュトラスマンとが彼らの画期的な論文を投稿し、その中でウランに中性子を照射すると周期表の中ほどにある元素バリウムが生成されることを記述したのでした。

以下この章では核分裂の発見に至るまでの歴史、なかでも三人の優れた女性物理学者たち(ドイツ人イーダ・タッケ-ノダック、フランス人イレヌ・ジョリオット-キュリー並びにオーストリア人のリーゼ・マイトナー)の重要な貢献について語ることにしましょう。

1.1 核変換 (1919 年～1935 年)

1.1.1 最初の核反応 (1919 年) – アーネスト・ラザフォード

最初に実験室内の環境で核変換、核反応を起こすことに成功したのはニュージーランド生まれの物理学者アーネスト・ラザフォード⁷でした[2, 3]。この出来事は彼が 1919 年に窒素原子 ^{14}N の核に高エネルギーの α 粒子を照射する実験を行った際に起こったものです。彼は自然に存在するポロニウムを α 粒子の源として使用しました。天然のポロニウムに含まれている同位体の ^{214}Po は α 粒子を 7.68MeV のエネルギーで放出します。これは α 粒子にしてはかなり高いエネルギー量を持つものであり、それがラザフォードの実験の成功の鍵となったのです。



挿絵 1: アーネスト・ラザフォード卿(1871～1937)

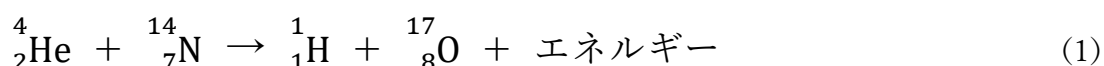
このエネルギー量の大きさを把握する目安として、7～8MeV は α 粒子の運動エネルギーとしてはかなり大きいということが鍵と言えます。自然に存在する放射性同位元素から放出される種々の α 粒子のエネルギーの平均値は 3～4MeV のあたりにあるからです。もう一つのおそらくもう少しわかりやすい方法は、このエネルギーを核子、つまり核の中の陽子や中性子、を繋ぎ止めている結合エネルギーと比較することです。一つの核子が原子核に結合されるために必要な俗に「原子力」と呼ばれるエネルギー量の平均は核子一つあたり約 8～

⁷ アーネスト・ラザフォード卿(Sir Ernest Rutherford, 1871～1937)はニュージーランド出身の物理学者で原子物理学の「生みの父」として知られている。1908 年に「元素の壊変並びに放射性物質の化学に関する研究」によりノーベル化学賞を受賞。伝記は本書の第 2 章第 1 節を参照のこと。

9MeV です。(ここでいう「原子力」は原子炉とは全く無関係です。この表現は英語の nuclear forces に対応するもので、物理学では強い相互作用とも呼ばれます。「クーロン反発力」とも呼ばれる陽子同士の反発電気力に対抗して原子核を繋ぎ止めているのはこの力なのです)。この核力は一つの核子を原子核からもぎ取るのに必要なエネルギーと同じくらいの強さなのです。平均の結合エネルギー、特に原子核の表面に存在している核子一つを結合するエネルギーの量は原子核や同位体の種類によって多少異なります。

しかし核子間の核力は核子同士が非常に近接している場合にしか作用しないようで、そこまで近づくためには、入射する荷電粒子はクーロン障壁と呼ばれる原子核内の陽子による電気力に打ち勝つことが必要です。ポロニウムからの α 粒子はこれを成し遂げることができ、その後の過程は技術用語を多少用いると下記のように説明することができます。 α 粒子は窒素原子核に「吸い込まれて」いわゆる複合核を生成します。これは窒素の原子核と α 粒子が一緒になったものから成り立っていますが、安定ではないのです。この複合核はいわゆる励起状態にあります。 α 粒子の運動エネルギーとその捕獲が原子核に与える追加のエネルギー(結合エネルギー)とが原子核内の全ての核子を振動させるからです。原子核は、陽子(つまり水素の原子核である ^1H)を一つ放出する一方で酸素の同位体の一つである ^{17}O に転換し、この放出された陽子が複合核の持っていた過剰エネルギーを持ち去るのです。

ラザフォードはこれを通じて陽子(プロトン、proton)の存在も初めて証明したのでした(proto はギリシア語で「最初」という意味です)。下記の式はこのことを象徴的に表しています。



下の指数は原子核内の陽子数(原子番号(Z)と同じ)、上の指数は原子核の質量あるいは質量数(A)を示しています。この反応によって解放されたエネルギー(照射される荷電粒子の運動エネルギーを含む)は反応の生成物(この場合には陽子)に運動エネルギーの形で存在しています。これは陽子の質量が酸素原子の質量よりもはるかに軽いからです。(これは運動量と運動エネルギーが保存されるためです。小銃を撃った場合を考えてみてください。エネルギーの大半を搬送するのは重い小銃ではなくて非常に軽い銃弾の方です)。この反応は下記のようにもっと短く表現することができます。



これは (α, p) 反応と呼ばれるもので、入射粒子とも呼ばれる到来してくる粒子が α 粒子、放出される方の粒子は陽子です(ローマ字の p がこれを示します)。

この科学的な新情報の主要価値は、核反応によって一つの元素を人工的に別の元素に変換することが可能であるということの理解でした。銅あるいは別のもっと安い物質から金を造り出して大金を稼ぐことは昔の錬金術師たちの夢でしたから、これはまさに大きな出来事であったと言えます。そのうえ同時に比較的大量のエネルギーが解放されるわけですから、考えてみれば、それもまた何とも膨大な可能性を孕んでいました。化学反応に比べると、核反応では同一の質量の物質から最大で何百万倍ものエネルギーを解放できるのですから、軍事的立場からの明白な利益のみならず経済的にも価値が非常に高いものとなる可能性のあるわけでした。

ですがラザフォード自身は、核反応を使用してそこまで大規模なエネルギーを生産する可能性など全く信じていませんでした。彼はこの不信を自分から隠しもせず、公の数々の講演の中でそれについて長々と述べたものでした。レスターの王立協会でのある会合で彼自身の語った言葉が 1933 年 9 月刊のタイムズ紙に「原子の壊変」という見出しで下記のように書かれています[4]。

「これらの過程においては、陽子が供給するエネルギーに比べるとずっとかなり多くのエネルギーを取り出すことが可能ですが、この方法でエネルギーを生産することは期待できません。これはエネルギーの生産方法としては不毛で非効率的なものですから、一部の人が言っているような、原子核変換過程の中にエネルギーを探求するような考えは馬鹿々々しい戯言と言えましょう。ですが、この課題は原子核の内部に関する洞察を与えてくれたという意味で科学的には興味深いものです」

科学の定期刊行誌ネイチャー(Nature)は 1933 年 9 月 12 日版に下記のような報告を記載しています[4]。

「原子核変換にエネルギー源を探求する者たちに対して、そのような期待は全くの戯言だ、というのがラザフォード氏の時宜を得たメッセージだった。」[2]。

また、ネイチャー誌には下記のようなラザフォードの批評も引用されていました。

「これらの原子核変換が科学的には非常に興味深いものであることはもちろん確かだが、

我々人間たちが原子核のエネルギーを産業的な価値があるものとして使いこなすことは不可能であって、私としては、我々がその段階に到達することはないものと確信している。我々のこの分野への関心は純粋に科学的なものであり、我々の行う実験は物質の内部構造を理解するのに貢献することだろう。」

ハンガリー生まれの物理学者エドワード・テラー⁸は 1933 年の秋にロンドンで開催された物理学者の会合での出来事を下記のように回想しています[5]。

「ラザフォードは核エネルギーの利用が可能と信じている一部の楽観的な狂信者たちのことを 10～15 分間話していた。これは全く不可能なことだ、とラザフォード氏は言葉を続けた。原子核のエネルギーは物理学者たちだけでは興味深いものであるが、これを使いこなすことはどんな形態下でも不可能だ」。

また、テラーはレオ・シラードがラザフォードを訪ねて彼の支持を依頼した後に彼に語った話のことも次のように回想しています[4]。

「彼(シラード)はラザフォードを訪ねて、核エネルギーは勿論利用できるし、巨大な爆発を起こすことも可能であると主張した。ラザフォードは単に部屋から彼を追い出すことでこれに対応した。ラザフォードは憤激のあまり、暫くの間、この考えがどんなに馬鹿々々しいものかということばかりを繰り返していた。」

ラザフォードはこの考えと信念とを生涯変えませんでした。そして実をいえばこう考えていたのは彼一人ではありませんでした。この時点ではアルバート・アインシュタイン⁹やニルス・ボーアも核エネルギーの利用に関しては同様の考えを持っていたのです。彼らも粒子に関する実験を核物理学の知識を深めるための貴重な手段と見做していましたが、原子核のエネルギーを実用的な目的に使いこなすという一般からの期待に関してはまず不可能なものと信じていたのです。ボーアは原子力を使いこなせるようになる可能性は非常に

⁸ エドワード・テラー(Edward Teller, 1908～2003)はハンガリー生まれのアメリカ合衆国の物理学者で水素爆弾の生みの父として最も知られており、生存中にアルバート・アインシュタイン賞(1958 年)、エンリコ・フェルミ賞(1962 年)、アメリカ国家科学賞(1982 年)等幾つもの賞を受賞した。

⁹ アルバート・アインシュタイン(Albert Einstein, 1879～1921)はドイツ生まれでスイスとアメリカ合衆国の国籍を持つ物理学者であり、1921 年に「光電効果の発見の功績」によりノーベル物理学賞を受賞した。

低い、という程度でしたが、アインシュタインは粒子による物質の照射のことを「まるで闇夜に散らばった何羽かの鳥を撃つようなもの」(1934 年のある記者会見での発言)と比喩的に表現しました。

ラザフォードのこの否定的な立場が核エネルギーの開発を妨げたというわけではありません。この本のもう少し先で述べるように、事態はむしろ逆の展開を遂げました。歴史を振り返って後知恵を振りまくのは簡単ですが、それにしてもラザフォードがこのような間違いを犯したのは不思議なことです。彼の懐疑の背景はいったい何だったのでしょうか。一つの推測は、ラザフォードは基礎研究と応用(つまり学問外での利益追求を可能とする)研究開発との間にはっきりと区別をつけて基礎科学を保護推進したかったのだろう、というものです。この考えはラザフォードの時代の状況の解釈には合わないでしょうが、今日の状況には非常に関連が深いものと言えます。原子力技術の分野をみただけでも、原子力エネルギーの利用に重点をおいている一部の国々では学問的に質の高い研究よりも先見性のない応用研究の方に重点が置かれていることが目に留まります。

核エネルギーの大規模な利用についてもっと实际的に反論して少なくともその難しさを指摘することは容易です。これには二つの要素が絡んでいます。一つはエネルギー生産の規模、もう一つは収益性です。核反応から解放されるエネルギーがこれに相応する化学反応よりずっと大きいことは確かですが、それは巨視的な規模からみればごく僅かなものです。ラザフォードは核反応を起こすことに何回か成功しましたが、このエネルギーが実用的な意味を獲得するには膨大な量の核反応を引き起こさなくてはなりません。1立方センチメートルの石炭は(アボガドロ定数から計算して)約 10^{24} 個の原子から成り立っていますから、この石炭の立方体を燃焼させると一つあたりの原子の燃焼エネルギーの 10^{24} 倍のエネルギーが得られることとなります。この規模まで到達すれば解放されるエネルギー量が巨視的にも使い途のあるものとなります。ラザフォードの使用した方法でそこまで大規模な核反応を引き起こすには、膨大な量のポロニウム源とともに巨大な放射線防御装置等が必要となります。この他にも、エネルギー密度があまりにも低すぎるとか放出された陽子その他の粒子の運動エネルギーを活用する上で非効率性等、幾つもの技術上の困難の克服が必要でした。

ですが、根本の障害はこうした技術上の諸問題ではありませんでした。この根本の障害は、核反応によって生産されるエネルギーは上記の諸困難が克服されたとしても入射する

粒子の運動エネルギーの形態で投入されるエネルギーよりも低いためこのような装置は逆に「エネルギーの大量消費装置」になってしまうことなのです。個々の反応ではエネルギー収支は正值なのにどうしてこういうことになるのでしょうか？ 答えは簡単です。核反応を引き起こすことができるのは照射用に投入される α 粒子のうちのごく僅かな部分だけからです。これは、前に述べたクーロンの法則、つまり同符号の電荷を持つ粒子同士の間の反発力のせいです。原子核も衝撃側の軽い粒子(陽子や α 粒子)も正值に荷電されていますから、この陽子あるいは α 粒子はクーロンの障壁を突き抜けて必要な距離まで核に近づかなくてはなりません。発射当初には勿論物質の中に入った入射粒子は十分に高いエネルギーを保持していますが、それだけでは足りません。入射粒子は真正面から衝突しなくてはならないのです。これは容易なことではありません。なぜなら、標的核は物質の中のあちらこちらに小さな点のように散らばって存在しているからです。 α 粒子が原子核を「かする」程度のほぼ正しい方角から来たとしてもクーロンの反発力が粒子の進路を曲げてしまうので衝突には至らないのです。アインシュタインが「闇夜に鳥を撃つようなもの」といったのはこのことを指していたのです。

α 粒子はたくさんの核の傍を通過するのだから、遅かれ早かれ正面衝突が起こるだろう、と思われるかもしれませんが、ここにもう一つ別の要素が絡んできます。物質の中を進行している荷電粒子はいわゆる電子制動のためエネルギーを急速に失ってしまいます。一方で α 粒子は原子核から逸れて行くときにその原子核をその通常的位置からほんの僅かながら動かすため、 α 粒子の運動エネルギーのほんの一部がクーロン力により原子核に移行して原子核が自分の位置の周りで前後に振動します。もう一つ重要なことは、原子の周囲及び間には多数の電子が存在しているので、 α 粒子は通過の際にクーロン引力でこれらの電子をも動かし、その過程でもエネルギーを失ってしまうのです。 α 粒子は粘っこいスूपに似た電子の雲の中を放浪する間に絶え間なく制動されるのだ、とでも言えましょう。結果として、大半の α 粒子は制動放射のためにエネルギーの大半を急速に失ってしまうので、クーロン障壁を突き抜けて正面衝突することができなくなってしまうのです。これらの粒子の運動エネルギーは単に消失してしまいます。

簡単な計算の例を見てみましょう。イェーテボリ市のジブラルタル通り沿いのチャルマース工科大学の原子物理学部の建物(チャルマースの機構改革後はフィットネスクラブになっている)には以前中性子の発生装置が一台ありました。この装置を使って重水素イオン(核に陽子一つだけでなく中性子も一つ存在している水素の同位体の一種)を加速してこれらを

標的核のトリチウムに衝突させることができました。（トリチウムは三重水素とも呼ばれ、その核は一つの陽子と二つの中性子から成り立っています。）重水素と三重水素が反応すると α 粒子一つと中性子一つが生成され、軽い中性子の方がエネルギーの大半、約 14.1MeV を取得します。加速電圧、電流及び中性子収量からエネルギーの収支を計算することができます。私たちの結論は、14.1MeV のエネルギーを持つ中性子の生成には 62500MeV のエネルギーの供給が必要だ、ということでした。

この状況を薪の燃焼と比較してみましょう。一本の薪にマッチで火をつけるとそこからある決まった分量のエネルギーを発生することができます。ある量のエネルギーを費やして製造されたマッチ自体は消えてなくなってしまうものの、それよりももっとずっと多くのエネルギー量を発生させることができます。ですが、薪の代わりにおが屑を燃やし、そのおが屑の一つ一つを燃やすのにマッチが一本ずつ必要なものと仮定してみましょう。するとこの燃焼過程は利益の上がないものになってしまいます。ラザフォードが核反応からエネルギーを抽出するのに使用した方法はおが屑に一つ一つマッチで点火するようなものだったのです。採算が取れるためには、最初に点火するだけでそれが自発性の持続過程を引き起こすような方法が必要でした。この本のもう少し先で述べるように、この連鎖反応の形式を思いついたのがレオ・シラードだったのです。しかし彼のアイデアは中性子なしには機能しません。ですからここでちょっと本筋を離れて中性子の発見について述べることにしましょう。

1.1.2 中性子の発見 (1932 年) – ジェームズ・チャドウィック

1920 年代の末には原子核の記述には何かが欠けていることが日増しに明らかとなりました。この時点で存在が知られていたのは陽子と電子だけでした。核には電子殻にある電子の二倍の数の陽子が存在し、その陽子の半数は核内の電子との組み合わせによって電氣的に中性化されているものと仮定されていたのです。この説明には初めから問題がありました。電子の波数が大きくなりすぎて原子核の中にこれらの粒子が納まらないうえ、この陽子 - 電子の仮説は、一部の実験のデータと一致しなかったからです。一部の物質においてはいわゆる核スピ



挿絵2: ジェームズ・チャドウィック
(1891~1974)

ンと呼ばれる核内部の角運動量を電子と陽子の角運動量の和と一致させることができなかったのです。

その上に、不可解さをますます強める次のような事実が明らかになって来るのでした。1930 年代の初期に数人の研究者たち(例えばドイツのヴァルター・ボータやフランスのジョリオット - キュリー夫妻が、リチウム、ベリリウムあるいはホウ素にポロニウムから 5 MeV の α 粒子を照射すると貫通性の放射線が発生することを発見しました。人々はこれが γ 放射線に違いないと信じてその放射線のエネルギーを計測しようとしてしました。当時ケンブリッジに在職していたジェームズ・チャドウィック¹⁰(後に爵位を受けてジェームズ・チャドウィック卿となった)は 1932 年にポロニウム核の α 粒子をベリリウムに衝突させる実験を行いました。ベリリウムの後ろにはパラフィンが置かれ、このパラフィンから放出される陽子が自家製のガイガー・ミュラー計数管によって検知されるようになっていました。このパラフィンとガイガー・ミュラー計数管の間に厚さの違うアルミニウムのフォイルを置くこと

¹⁰ ジェームズ・チャドウィック (James Chadwick, 1891~1974) はマンチェスターとケンブリッジで学んだ英国の物理学者である。彼は 1932 年の中性子発見のため 1935 年にノーベル物理学賞を受賞。また 1932 年には英国王立協会からのヒューズ・メダル、1951 年にはフランクリン・メダルも受賞した。

によって陽子のエネルギーを推測することができたのです。

チャドウィックは初めこの貫通性の無荷電の放射線がガンマ放射線だと考えたのですが、エネルギーのバランスの計算が合いません。彼は陽子との衝突の際の放射線はこれらの陽子に約 5MeV のエネルギーを与えるのに対し、窒素との衝突の際のエネルギーは最大で約 1.2MeV に過ぎないことを観察しました。もし γ 放射線であったなら、これには約 50MeV 並びに 90MeV のエネルギーが必要とされるはずです。入射エネルギーの量がこれほど高く、しかもこんなに大きく食い違うことはあり得ませんので、 γ 放射線が入射したと考えることはできません。

チャドウィックは陽子とほぼ同じ質量を持つ中性の粒子の存在を仮定することでこの矛盾を解消しました。彼の説明に基づけば、この仮定の中性子が陽子一つからなっている水素の核と衝突するとこの陽子が最大で中性子のエネルギーとほぼ同じ量のエネルギーを得るのに対し、もっと重い窒素の核と衝突した場合にはその核は最大で中性子の約四分の一のエネルギーにしかならないことが簡単な計算で分かります。またこれは中性子のエネルギーが 5MeV だと仮定すると測定されたエネルギーとも一致します。

中性子の存在は原子核の理解を大幅に変えました。核内に電子や余分な陽子の存在を仮定する必要がなくなり、核はほぼ同数の中性子と陽子とから成り立っていてその周りを陽子と同数の電子が回っているという理解に取って代わりました。核スピンにより陽子と電子のスピンを正しく説明することができるうえ、陽子間の反発的な電気力にも拘わらず核が結合しているのは中性子のおかげで、いわゆる強い相互作用(「核エネルギー」)によって中性子と陽子とが相互に影響し合っているからだということも明らかになりました。

ですが中性子の意義は核の結合に果たす役割だけではありません。中性子はまた核反応を引き起こすこともできるのです。中性子がある物質と衝突する場合等、中性子を伴う核反応には大きな利点があります。加速装置内では、荷電粒子を使えばできるように中性子のエネルギーを操作することはできませんが、その一方で中性子はクーロン障壁を突き抜けるためにエネルギーを使う必要がありません。中性子は跳ね飛ばされないし、その軌道を陽子の電界に曲げられることもないので、一番遅い中性子でも核に必要な距離まで接近して強い相互作用を引き起こすことができるのです。言い換えると、中性子には運動エネルギーを持つ必要がないのです。強い相互作用はいつでも誘発的ですから核が中性子を捕えると必ずエネルギーが追加されることになります。このことが核に励起状態をもたらし、大抵の場合に核反応、つまり陽子または α 粒子の放出を引き起こすのです。(過剰エネルギーを喪失

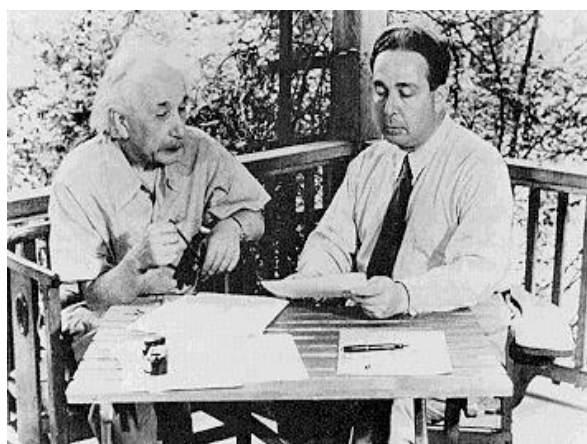
するもう一つの可能性は勿論 γ 光子の放射で、その場合にはそれ以外の反応生成物は必要ありません。)

中性子の発見後には活発な研究活動が行われました。既に同年、中性子を使用しての核反応が成功しました。1934 年から 1938 年の間にはなかでもイタリアでのフェルミと彼の同僚たちの功績が注目に値します。彼らは核反応を引き起こすには速度の遅い中性子の方が特に効率が高いことを証明したのです。速度の遅い中性子を使用すると自然元素の大半を放射性にすることができるのです。これらのことについては本書のもう少し先で述べることにして、次節ではレオ・シラードと彼の連鎖反応のアイデアに戻りましょう。

1.1.3 連鎖反応のアイデア (1934 年) – レオ・シラード

ハンガリー生まれの物理学者レオ・シラード¹¹は非常に興味深い個性の強い人でした。彼はナチの迫害を逃れて英国に移住しましたが、他の人たちが不可能と考えた問題を取り上げて解決することが好きな人でした。彼の理論物理学への最大の貢献は、アインシュタインが立証不可能と見做した統計物理学のある定理を証明したことです。この証明は今日の情報理論の基盤の一つとなりました。また、彼は実用化にも優れた才能を持つ人で、アインシュタインと一緒に取得したコンプレッサー部分のない冷蔵庫に関する特許を初め、数多くの特許を保持していました。

ラザフォードが原子のエネルギーを活用することは不可能だと主張したと聞いたシラードは即座にこれを論破しなくてはと考えました。彼はエネルギーのバランスが問題の鍵であることを見抜き、一つの核反応がその後に引き続いて起こる同様の反応を可能とするためには自動継続過程を作り出すことが必要だということを理解しました。この頃タイミングよく中性子が発見されたので、核反応をエネルギーの閾値に関係なく荷電粒子より



挿絵 3: レオ・シラードとアルバート・アインシュタインが 1939 年 8 月 2 日にフランクリン・デラノ・ルーズベルト大統領に送った手紙に署名した出来事の 1946 年 1 月の再現。下記注(a)を参照のこと

もっと簡単に起こすことができるようになりました。彼のアイデアは、エネルギーを創造す

¹¹ レオ・シラード(Leó Szilárd, 1898～1964)はハンガリー生まれのアメリカ合衆国の物理学者で、多数の特許の保持者であった。その中には核連鎖反応に関する特許(英国の特許 630726 号)、エンリコ・フェルミと共に取得した原子炉に関する特許(合衆国の特許 2708656 号)などが含まれている。本書第 2 章第 2 節の伝記を参照のこと。

(a) フランクリン・デラノ・ルーズベルト大統領あての手紙の中で、アインシュタインは彼にドイツが原子爆弾を製造する可能性があるかと警告した。ルーズベルトのウラン研究の許可を得て 1939 年 10 月にウラン委員会が設立された。

るとともに中性子を二つ放出するような中性子誘発性の核反応を見つけることでした。(一つ一つの反応毎に新しい中性子を必要としていたのでは、中性子がこの過程と競争する他の諸過程や拡散などによって必ず失われてしまうので現実的には機能しません)。

ラザフォードの講演を聴いた後ロンドンの通りを歩いて家に帰る途中で突然にこのアイデアが浮かんだ時のことを表現したシラード自身の言葉には興味深いものがあります。彼はその時のことを次のように回想しています[4, 6]：

「(ラザフォードが主張したような) 議論は私の頭の中を占めてしまいました。ホルボーンとサザンプトンとの交差点の赤信号で足を止めて信号が変わるのを待ったことを記憶しています。信号が青に変わった時、もし中性子に当たって分裂した時に中性子を一つ吸収する傍らで中性子を二つ放出するような元素を見つけてそれを必要な量だけ集めれば、連鎖核反応を起こさせることができる、という考えが突然に浮かびました。この時点では私は、どのようにしてそのような適切な元素を見つけたらよいのかとかどんな実験が必要かなどについての詳細までは考えつきませんでした。私はこの考えを捨てることができませんでした。一定の条件下で連鎖核反応を起こせば工業用にエネルギーを大規模に生成し、また原子爆弾を製造することも可能はずです。これが実際に可能ではないか、という考えを私はどうしても手放すことができませんでした。」

(この話は多少伝説的な部分があるかもしれないのでそのまま鵜呑みにはしないほうがよいかもしれません。シラードの友人たちは、彼は赤信号で立ち止まりなどしない奴だと言っていますから・・・[4])。

このアイデアは全く新しいものでしたから、シラードは中性子による核の照射に関する特許取得を2件、双方とも「化学物質変換の改良あるいは関係について」という表題で申請しました。一つは英国の特許 440,023 号(登録番号 GB19340007840, 1934 年 3 月 12 日)、もう一つは 630726 号(登録番号 GB19340019157, 1934 年 6 月 28 日)でした[7]。最初の特許申請は起動用中性子の生産方法並びに個々の中性子による核変換だけに関するもので、もう一つの特許の内容は連鎖反応のアイデアでした。また、彼は反応を起こす時にその形状と大きさの持つ意義を明確にして、「臨界厚さ(critical thickness)」という表現を使って臨界質量(critical mass)の概念を導入しました。今日ではよく知られているとおり、物質内で連鎖反応を引き起こす中性子の数が物質表面から失われる中性子の数より多くなって連鎖反応を維持するためには物質の質量は臨界質量よりも大きくなくてはなりません。このアイ

デアが使用された場合の結果を考慮したシラードは、1936年3月に英国海軍本部を通して登録番号 8142/36 の通知の中で連鎖反応に関する彼の特許を機密扱いにするよう申請しました。特許 630726 号は 13 年間の機密扱いの後 1949 年 9 月 28 日に公表されました。

シラードの特許の第 1 頁の一部を挿絵 4 に掲載します。爆発を引き起こすために中性子注入による連鎖反応を使用するという彼の考えの概要は次のとおりでした：

「中性子を使用した連鎖反応は準安定性の元素なしには起こせない。こうした元素は中性子一つを捕獲して核に中性子の結合エネルギーが添加されるが、そのエネルギー量はこの核が壊れてエネルギーを解放するとともに二つの中性子を放出させるのに必要なだけの量でなければならない。(例えばウランやトリウムはこれらの元素の α 壊変を通じて示される。) この原理に拠って従来の爆弾よりも数千倍も効率の高い爆発装置を造り出すことは不可能とは言えず、むしろほんの僅かながら可能性が存在するというべきである。」

シラードは勿論これらの条件を満たす物質を突き止めたいと考えました。それは新たな実験を通してのみ可能なことでした。ですが彼はそのような実験に経済的な補助を得ることができませんでした。彼はベリリウム、インジウム、ホウ素やウランといった物質、その中でも特にベリリウムを適切な候補と考えました。彼は同位体 ${}^9\text{Be}$ が不安定で即時に壊変して二つの α 粒子、つまり ${}^4\text{He}$ の核に変換することを知っていました。彼の仮説は、ベリリウムの同位体 ${}^9\text{Be}$ が中性子一つを捕獲すればその中性子から添加された結合エネルギーが二つの中性子(入射してくるものともう一つ核の中にあったもの)を放出するだろう、というものでした。これらの中性子は ${}^8\text{Be}$ を後に残し、それが即時に二つの α 粒子に壊変するはずだ、と考えたのです。この反応は次のように表すことができます。



これは非凡な考えでした。中性子の増倍、つまり連鎖反応の主要条件が保証されます⁸。 Be の壊変がエネルギーを生産します。正の反応エネルギーを伴う反応、つまり「発熱性」の反応です。

ですがこの考えには一つの弱点がありました。反応エネルギーの総和、つまり中性子を核からもぎ取るエネルギーと残された ${}^8\text{Be}$ の核の壊変とを加えるとエネルギーの収支は負になってしまうのです(吸熱性過程)。初めのうちはこの事実は知られておらず、ここに私たちはまたしても、核反応や核分裂の発見に歴史的な出来事が幾度となく及ぼした影響の重

要さを垣間見ることができます。一つの反応が発熱性か吸熱性かは反応前後の核と粒子の質量の質量収支あるいは質量欠損を見て確かめることができます。もし反応前の構成要素の質量が反応後のものよりも大きければこれは正の質量欠損であって、反応に伴ってエネルギーが生成されることを意味しています。シラードは、多数の非放射性元素の同位体の計測を行った有名な質量分析者フランシス・アストン¹²がまとめた文献に記載されている種々の原子の重さを使用してこのことを確かめました。(3)の表現の双方の側から中性子を一つずつ除去すれば、 ${}^9\text{Be}$ と α 粒子二つに中性子一つ加えたものとの質量の差を調べることができます。シラードの結論は下記の(4)が示す通りで、質量欠損は正值だというものでした。

$$m_{\text{Be}} - (2 \cdot m_{\text{He}} + m_n) = 9.0155 - (8.0023 + 1.0080) = +0.0032 > 0 \quad (4)$$

(4)及び(5)では全ての質量は中性子あるいは陽子一つの質量とほぼ同じ m_u と呼ばれる単位で示されています。さらに詳しい記述はこの章末の付属資料 1 を参照してください。

ですが、後になってノーベル賞受賞者アストンの質量値は不正確だったことが判明しました。正しい値を使用すると(4)の結論は下記のようにになります。

$$m_{\text{Be}} - (2 \cdot m_{\text{He}} + m_n) = 9.0120 - (8.0052 + 1.0087) = -0.0019 < 0 \quad (5)$$

つまり、質量欠損は負値でありこの反応は実は吸熱性だということになります。

シラードはその後幾つもの元素を使用して発熱性の $n \rightarrow 2n$ の反応を探求しましたが勿論うまくいかず、しまいには諦めて 1938 年にロンドンの特許庁に下記の電報を送って特許の取り消しを依頼したのでした[4]。

「8142/36 に関しては特許を取得する必要はないように思われますので、この特許全体を取り消して下さるようご依頼申し上げます。」

¹² フランシス・ウィリアム・アストン(Francis William Aston, 1877~1945)は英国の物理学者で 1922 年に「彼の質量分析器を使用しての多くの非放射性元素の同位体の発見並びに整数則の提唱」の貢献をもってノーベル化学賞を受賞した。

皮肉なことにこの出来事が起こったのは核分裂過程の発見の直前でした。シラードは 1938 年の末に核分裂のことを知ったとき、これこそ彼が探していた過程、つまり連鎖反応に適切な過程だということを理解しました。ですから彼は 1939 年 1 月 26 日に英国の海軍本部に再び電報を送って、特許の取り消し依頼を無視してくれるように、と次のように依頼したのでした[4]。

「CP10 の特許 8142/36 に関して私が最近送付した手紙を無視してくださるようにご依頼申し上げます。」

PATENT SPECIFICATION



Application Date: March 12, 1934. No. 7840/34.

440.023

" " July 4, 1934. No. 33540/35.

(No. 33540/35 being divided out of Application No. 19721/34.)

Application Date: Sept. 20, 1934. No. 27050/34.

One Complete Specification Left: April 9, 1935.

(Under Section 16 of the Patents and Designs Acts, 1907 to 1932.)

Specification Accepted; Dec. 12, 1935.

PROVISIONAL SPECIFICATION

No. 7840 A.D. 1934.

Improvements in or relating to the Transmutation of Chemical Elements

I, LEO SZILARD, a citizen of Germany and Hungary, c/o Claremont Haynes & Co., Vernon House, Bloomsbury Square, London, W.C.1, do hereby
5 declare the nature of this invention to be as follows:—

10 It has been demonstrated that if atoms or nuclei, e.g. hydrogen atoms (or protons), heavy hydrogen atoms, referred to from now onwards as diplogen, (or diplogen ions, referred to from now on-

equal to unity one still has to face the fact that a shooting particle has to travel for instance in air a large distance in order to encounter a nuclear collision (which may cause transmutation), but due to the energy loss which it suffers through ionizing the air its range is comparatively small if its initial velocity
55 corresponds to several million volts energy. Only a fraction of the above mentioned shooting particles can there-

PATENT SPECIFICATION

630.726



Application Date: June 28, 1934. No. 19157/34.

" " July 4, 1934. No. 19721/34.

One Complete Specification left (under Section 16 of the Patents and Designs Acts, 1907 to 1946): April 9, 1935.

Specification Accepted: March 30, 1936 (but withheld from publication under Section 30 of the Patent and Designs Acts 1907 to 1932)

Date of Publication: Sept. 28, 1949.

Index at acceptance:—Class 39(iv), P(1:2:3x).

PROVISIONAL SPECIFICATION

No. 19157 A.D. 1934.

Improvements in or relating to the Transmutation of Chemical Elements

5 I, LEO SZILARD, a citizen of Germany and subject of Hungary, c/o Claremont Haynes & Co., of Vernon House, Bloomsbury Square, London, W.C.1, do hereby
10 declare the nature of this invention to be as follows:—

This invention has for its object the production of radio active bodies the storage of energy through the production
10 of such bodies and the liberation of nuclear energy for power production and other purposes through nuclear trans-

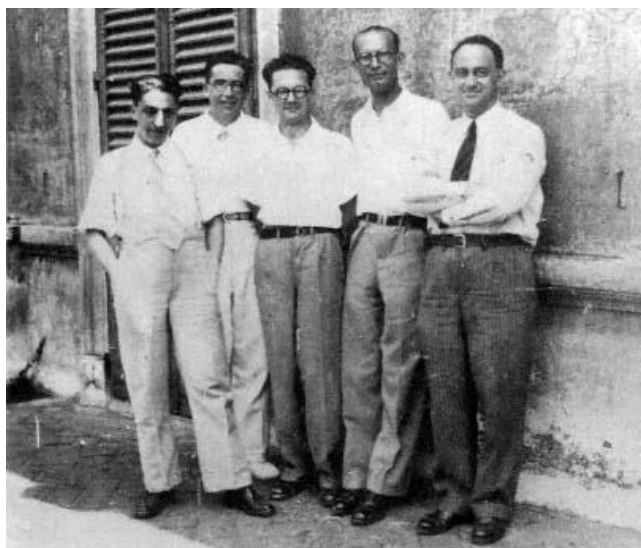
45 exceed the mean free path between two successive transmutations within the chain. For long chains composed of, say, 100 links the linear dimensions must be about ten times the mean free path.

I shall call a chain reaction in which
50 two efficient particles of different mass number alternate a "doublet chain." An example for a doublet chain which is a neutron chain would be the following reaction, which might be set up in a mixture of a "neutron reducer element"
55 (like lithium (6) or boron (10) or prefer-

挿絵 4: 連鎖反応に関するシラードの 1934 年の英国の二つの特許の各第 1 頁からの抜粋

1.1.4 中性子照射によるウラン反応 (1934 年) — エンリコ・フェルミ

1932 年のジェームズ・チャドウィックの中性子の発見後、中性子の反応に関して活発な研究活動が行われました。数人の研究者たちが実験の仕事を始めましたが、核反応における中性子の意義を完全に理解したのはエンリコ・フェルミ¹³が最初でした[2, 8]。中性子には電荷がないため核を取り巻く反発的なクーロン障壁を簡単に通過して原子核に到着することができます。そのうえ、中性子は荷電粒子とは違って電子と電気力の相互作用もないので物質内を通過する間に速度が落ちることもありません。言い換えると、陽子や α 粒子の物質通過の説明の際に述べたような粘っこいスープは中性子には存在しません。中性子は原子核と衝突する以前にそのエネルギーを殆ど失わないのです。中性子はその航続距離が非常に長いのだと言えます。ですから中性子は荷電粒子よりも核反応を起こす可能性が高いのです。簡潔に言うと、この簡単な事実がなぜ核融合よりも核分裂の技術に基づいた



挿絵 5: ローマの研究チーム (1934 年)。左から：オスカル・ダゴスティーノ、エミリオ・セグレ、エドアルド・アマルデ、フランコ・ラセッティとエンリコ・フェルミ

原子炉を建設する方がずっと簡単かということを説明しています。核融合を利用した原子炉は荷電粒子間の反応に基づくものだからです。

もっと正確に表現すれば、「飛程」という言葉は、一定のエネルギーを保持した一定の種類の荷電粒子一つがそのエネルギーをほぼ全部失って停止する前にある物質のなかを通過した距離を意味しています。同種で同量のエネルギーを保持した多量の粒子が停止する前

¹³ エンリコ・フェルミ (Enrico Fermi, 1901～1954) はイタリア生まれのアメリカ合衆国の物理学者で、「中性子照射による新しい放射性元素の存在の証明、並びにこれに関連した低速の中性子の引き起こす核反応の発見」の功績により 1938 年にノーベル賞を受賞した。伝記は本書の第 2 章第 3 節を参照のこと。

に同じ物質を通過した距離はまず全く同じで、相違は非常に僅かなのです。これは、あの「粘っこいスープ」の例えのように、距離一単位当たりの粒子のエネルギーの損失量の大きさは決まっていて、初期のエネルギーと「スープの粘っこさ」とによってその移動の距離が決定されるからなのです。この距離を平均したものが「飛程」で、実験時の距離のごく僅かの相違は「ストラグリング(straggling)」と呼ばれます。この距離の長さは固体内ではマイクロメートルで表されるほどに非常に短く、また気体化した物質の中でもごく短いことを付記しておかなければなりません。荷電粒子を（例えば加速器内で）1 ミリメートル以上移動させる必要がある場合には実験を真空内で行わなくてはならないのはこれが理由なのです。

上記のようなわけで中性子はこの意味で「飛程が欠けている」といわれます。中性子が荷電粒子よりも短い距離しか移動しないというわけではなく、むしろその反対で、一つの中性子が核反応の中に消えてしまう前に通過する距離は統計の法則に支配されて決まるということの意味しているのです。一部の中性子がすぐに核と衝突する一方で、他の中性子は核反応に巻き込まれる前にもっとずっと長い距離を通過します。一つの中性子が衝突せずに一定の距離を通過する可能性は距離の長さとともに単調に減少し、この可能性は通過経路の長さとともに指数関数の逆数に沿うように減少するのです。日常的に例えて言えば、太い木々が不規則な位置にまばらに生えている森（無定形の物質に対応）に銃弾（中性子に該当）を打ち込むようなものです。撃つときの方角により、一部の銃弾は森との境目で既に木に当たってしましますが、他の銃弾は当たる前にかなり奥まで森の中を通過していきます。この通過距離は銃弾によって異なり、遠くまで飛んで行く銃弾の数は通過する長さに比例して減少します。平均値（平均自由行程）を計算することはできますが、それでは移動距離を「飛程」ほどの確には示すことができません。ともあれ「平均自由行程」の概念は中性子に関して上記のような意味で使用されています。中性子の平均自由行程は荷電粒子の飛程より $10^3 \sim 10^4$ 倍も長いのです。

フェルミが早期に偶然に行った大変重要な観察は、中性子の核反応、特に捕獲の際には、中性子がより低いエネルギーになると非常に起こりやすくなるということでした。核反応によって放出される中性子は普通の場合 MeV の規模のエネルギーを保持しており、これは前にも述べたように高エネルギーと見做すことができます。いわゆる低エネルギーのよい目安は、空気中の分子や結晶格子など、原子や分子の保持するエネルギーがその周囲の環境と熱平衡状態にあることです。室温、つまり 20°C (293 ケルビン) に対応するエネルギーは原子一つあたり 0.0253 eV です。中性子がこのエネルギーのレベルまで速度を失ってしま

うと、もう衝突によってそれ以上のエネルギーを失うことはありません。つまり、この中性子は、熱運動している原子や核との幾つもの衝突を平均すると、失うエネルギーと同量のエネルギーを得るのです。

1934年10月22日、フェルミと彼のチームは、被験物質内に存在する標的核への到着以前に中性子にパラフィン塊を通過させると中性子の放出源から直接到来した中性子よりもずっと効率的に核反応を引き起こすことに気がつきました。フェルミはこの理由はもともと高速だった中性子たちがパラフィンに含まれる水素の原子と弾性的に衝突するためだという独創的な結論を下しました[9]。

中性子と他の核との弾性的な衝突に関しては本書では今まで触れませんでした。私たちはこれまで、等式(1)～(3)が示すように、入射体が一つの核反応を引き起こしたときにその残留核(Y)が標的核(X)とは違っている反応に焦点を当ててきました。これらの反応は $X(\alpha, p)Y$ 及び $X(n, 2n)Y$ 反応と記述できます。ですが、対象の標的核が反応の残留核と同じで、反応後に入射粒子の中性子が増えない $X(n, n)X$ 反応を作り出せないわけではありません。そのような反応は、以前に述べた複合核を用いて説明することもできます。ですが、複合核の生成なしに中性子の弾性的な散乱をもっと簡単に説明する方法があるのです。中性子はちょうどビリヤードの球が互いに衝突した時のように、核の表面で「跳ね返る」ことがX可能です。この種の衝突は「ポテンシャル散乱」とも呼ばれるもので、中性子の水素原子との衝突とビリヤードの球同士の衝突とが全く同様のものであることを示しています。中性子はその一部のエネルギーを損失(正しくはエネルギーを水素原子に移転)しますが、どの程度のエネルギーが移転されるかは衝突の激しさ、また正面衝突だったか斜めの衝突だったかによって異なります。

中性子が水素を含んだ物質等軽い元素から成り立つ物質を通り抜けるときに起こるのはこういうことなのです。中性子が原子核に移転できるエネルギーの最大値は核の質量によって決まります。中性子と水素原子の衝突の際のように双方の質量が同じ場合には中性子は真っ直ぐ中央に向けて衝突することですべてのエネルギーを移転することができます。もっと重い核と衝突する場合にはもっと少ないエネルギーしか移転されません(これは卓球の球がフットボールに当たって跳ね返る場合と比較できます)。原子炉内の高速の核分裂中性子の速度を低下させるのに普通の水が使用されるのはこのためです。

ですが核反応の起こる可能性はなぜ中性子エネルギーが低いと高くなるのでしょうか。

この説明にはビリヤード球との比較は通用しません。ビリヤード球同士の衝突は中性子が核全体と相互に作用するのではなくて核の表面をただ掠るだけの衝突に対応します。衝突によって中性子が吸収されたり、陽子または α 粒子を核から引き離すことができるためには中性子は核に突入できなければなりません。これが起こるにはこの中性子と核内の中性子及び陽子との間に強い牽引力が働き始めるところまで中性子が核に非常に接近しなければなりません。このウェル電位はホールが一つの漏斗型に造られたゴルフ場に例えることができます。中性子と同様、ゴルフの球はホールにちょうど入るときの速度の低いほうがうまくホールに入る確率が一番大きくなるのです。速過ぎると落ちずにホールの上を通過してしまいます。フェルミは中性子をまず水素の核と衝突させて速度を落としてからもっと重い物質の核に衝突させたため、この低速の中性子を核に吸収させることができたのです。

1933 年の末にはイレヌとフレデリック・ジョリオット - キュリー夫妻¹⁴が人工の放射能を発見しました。夫妻はホウ素とアルミニウムの試料をポロニウム源からの α 粒子に当たった後、 α 粒子の照射が終了してからも試料が引き続き放射線を放出していることに注目しました。夫妻は化学反応を用いてこれらの放射性の元素を分離することにより窒素とリンの放射性同位体¹⁵を発見しました。ホウ素に α 線を当てると窒素の同位体 ^{13}N が生ずるのに対し、アルミニウムに放射線を当てると ^{30}P が生成されました。この後者の同位体からは陽電子(電子の反粒子)一つの放出後にケイ素の同位体 ^{30}Si が生成されました。これらの同位体は自然には存在せず、実験室の中でだけ作り出せるもののなのです。

フェルミはチャドウィックの中性子の発見とジョリオット - キュリー夫妻の人工放射能とを組み合わせることによって中性子を照射して人工の放射能を造り出すことができたのでした。1934 年の初めからフェルミと彼の同僚たちは周期表上の大半の元素の同位体の系統的な研究を行いました。この研究のためにフェルミ自身は液体空気の温度に相当する温

¹⁴ イレヌ・ジョリオット - キュリー (Irène Joliot-Curie, 1897~1956) はフランスの化学者で夫のジャン・フレデリック・ジョリオット - キュリー (Jean Frédéric Joliot-Curie, 1900~1958) と共に 1935 年に「彼らの新たな放射性元素の合成の功績を認める」としてノーベル賞を受賞した。伝記は本書第 2 章第 5 節を参照のこと。

¹⁵ 同数の陽子を含むが中性子の数の異なる元素は同元素の同位体と呼ばれる。これらの同位体は同数の電子を電子の殻に持っているため、化学的な性質は同じだが核反応の仕方は非常に異なる。自然に存在するウランの二種類の同位体はこの例である。同位体 ^{235}U は低速の中性子によって簡単に分裂されるが、同位体 ^{238}U は分裂に最低 1.5MeV のエネルギーが必要である。

度下で気体のラドン(Rn)をベリリウム(Be)の粉の入った細いガラス管に凝縮させることにより、中性子源を造り出しました。ラドンは α 粒子を放射してベリリウムから中性子を放出させます。フェルミのチームは 63 種類の安定した元素に中性子を当てて 37 種類の新しい放射性の同位体を造り出すことに成功しました。これらの同位体は下記の三種の核反応のどれかによって生成されます[9]：

$${}_Z^MA + {}_0^1n \rightarrow {}_{Z-2}^{M-3}A + {}_2^4\text{He} \quad (6)$$

$${}_Z^MA + {}_0^1n \rightarrow {}_{Z-1}^MA + {}_1^1\text{H} \quad (7)$$

$${}_Z^MA + {}_0^1n \rightarrow {}_Z^{M+1}A + \gamma \rightarrow {}_{Z+1}^{M+1}A + e + \bar{\nu} \quad (8)$$

上記の式では Z は原子番号、M は質量数、n は中性子、e は電子、 $\bar{\nu}$ は反中性微子(質量がなく他の粒子とごく僅かにしか相互作用しないので貫通能力が高い粒子)を表しています。上記のどの反応においても衝突の際に複合核 ${}_Z^{M+1}A$ が一つ生成されます。軽い元素を使つての実験でフェルミは、中性子が α 粒子を一つ(式(6)が示すように(n, α)反応を引き起こして)放出させるか、あるいは陽子を一つ(式(7)が示すように(n,p)反応を引き起こして)放出させることを発見しました。これらの反応では、(式(7)によって)番号がより少ないが質量数は同じ新元素が生成されるか、あるいは(式(6)によって)原子番号と質量数双方ともより少ない新元素が生成されるのです。もっと重い諸元素は普通、式(8)に示したような形で反応します。これらの過程で衝突によって生成された複合核は反応以前と比べて中性子を一つ余計に持っているので質量数が M+1 となるのです。複合核はその後しばしば γ 光子を一つ放出し、それが「 β 壊変」と呼ばれるかなり遅延した反応を引き起こします。これは、複合核内の中性子 ${}_Z^{M+1}A$ が壊変して陽子一つ、電子一つ及び反中性微子一つになるのだということを意味しています。このようにして、質量数(M+1)は複合核と同じですがその原子番号が複合核(つまり中性子の照射を受けた元素)の原子番号よりも 1 単位多い(原子番号 Z+1)新元素が生成されるのです。注目に値するのは、幾種類かの元素は上述したこの三種類の反応を全部一度に起こせることです。例えば、アルミニウムの同位体 ${}^{27}\text{Al}$ に中性子を当てると次の三種類の異なった放射性の最終生産物が生成されます：ナトリウムの同位体 ${}^{24}\text{Na}$ (式(6)による)、マグネシウムの同位体 ${}^{27}\text{Mg}$ (式(7)による)あるいはアルミニウムの同位体 ${}^{28}\text{Al}$ 。 ${}^{28}\text{Al}$ は後に壊変してケイ素の同位体 ${}^{28}\text{Si}$ が生成されます(式(8)による)。

核反応を通じて原子番号のより高い諸元素に変換して周期表のより高い位置に移動させることができるということは非常に大きな可能性を開くものでした。周期表の最後に位置する最も重い元素に中性子を当てたら何が起こるのでしょうか？これまでは未知だった元素を生成することができるはずです天然に存在していて最も重い元素(当時周期表の最後に位置していた元素)は原子番号 Z が 92 のウランでした。フェルミは当時、ウランに中性子を照射すると超ウラン元素、つまり周期表に既に含まれているウランの次の位置に置かれる元素、の生成に導く可能性があるかと推論したのでした。上記に述べた過程を適用すれば、ウランの同位体で原子番号 Z が 92 の ^{238}U に中性子を照射するとまず初めにウラン同位体の ^{239}U が生成され、その後壊変によってそれまで知られていなかった原子番号 Z が 93 の最初の超ウラン元素を生成するはずです。

以上の推論のもとにフェルミは実験を行ったのですが、中性子の照射を受けたウランからの放射線は何故か非常に複雑なものでした。それは単に一種ではなく何種類もの β 放射能から成り立っており、これを超ウラン元素の壊変連鎖反応という形で説明することは不可能でした。これらの放射性の諸元素の検出は通常の化学分離を用いて行われました。こうしてフェルミは例えば半減期が 13 分の β 放射能(検出された幾つもの放射能の一つ)は周期表の鉛($Z=86$)とウラン($Z=92$)の間どの元素から生成されたものでもないことを確認することができました。これを基にして彼は、放射線は一種の超ウラン元素に由来するものと主張しました。1934 年にネイチャー誌に記載された論文の中で彼は半減期約 13 分のこの元素が第 93 番目の元素だと提案したのでした[10]。

「・・・我々はウラン(原子番号 92)、プロトアクチニウム(原子番号 91)、トリウム(原子番号 90)、アクチニウム(原子番号 89)、ラジウム(原子番号 88)、ビスマス(原子番号 83)並びに鉛(原子番号 82)の同位体に半減期が 13 分の放射能が由来する可能性を除外した。また、これらの反応の仕方はエカセシウム¹⁶(原子番号 87)とエマネーション¹⁷(原子番号 86)をも除外する。これほど多数の重元素が半減期 13 分の放射性の同位体を持っていないことは、この元素の原子番号が 92 よりも大きい可能性を示唆している。もしこれが元素 93 だとす

¹⁶ 今日ではフランシウム(francium)と呼ばれ、自然に存在する元素の中で最も不安定なものである。

¹⁷ ラドンの同位体の一つで放射性壊変の際に発生する。

れば、これは化学的にはマンガンやレニウムと同族と考えられる。」

フェルミと彼のチームはこのこれまで知られていなかった放射能を持つ元素がもっと軽い元素の同位体であるかどうかは確かめませんでした。これはそれまでに知られていた核反応よりももっと「激しい」もの、例えば照射を受けた核がより大きく分割されること、を仮定することになり、彼らはその可能性を考えもしなかったのです。彼らは自分たちの観察した当時未知の放射能はウランが一連の超ウラン元素(つまり $Z=93, 94$) に変換されるために発生するものだ と確信していたのです。1938 年 12 月 12 日のノーベル賞受賞講演の中でフェルミは次のように述べました[9]。

「・・・これらの幾種類かの放射能を持つ諸元素がウラン自身の同位体でもウランより軽くて原子番号が 86 以上の元素の同位体でもないという結果に基づいて我々は放射能の担体は原子番号が 92 よりも大きい一つまたはそれ以上の元素だという結論を下しました。在ローマの我々のチームはこれらの元素 93 並びに 94 をそれぞれアウセニウム並びにヘスペリウムと呼んでいます。」

(アウセニウム、Ao, はイタリアの詩的な呼名アウソニア (Ausonia) に、ヘスペリウムはギリシア語で「西の国」イタリアを指すヘスペリア (Hesperia, イタリア語ではエスペリオ、Esperio) に由来するもの)。

今日では私たちはフェルミと彼の同僚たちがそれとは知らずにウランの核分裂を起こしたことを知っています。そしてまるでサスペンスドラマの如くに、1938 年 12 月にフェルミがノーベル賞受賞講演で超ウラン元素のことを自信に満ちて語っていた時、在ベルリンのオットー・ハーンと彼のチームはバリウムを核分裂からの生成物として検出する最終的な結果に刻々と近づいていたのです。

フェルミと彼の同僚たちが何度もこの現象を起こすことに成功していながらそれでも核分裂の起こったことを見逃したことには科学史の見地から興味があります。多少簡素化し言うと、フェルミが核分裂という結論を下さなかった原因の一つに彼が極めて腕の優れた几帳面な実験物理学者だったことが挙げられます。もしあそこまで几帳面でなければ彼は核分裂の起こったことを理解し、核分裂の過程で二つの物質が生成されることが可能だと見抜けたかもしれません。これらの物質はどちらも帯電していて非常にエネルギーが高く(核分裂からの両方の残存物を合計すると約 200MeV に相当)、これが電離箱とガイガーカウンターに膨大な測定値として観察されたはずです。1935 年の初めにフェルミは新造の

電離箱を用いて超ウラン元素を検出する新たな実験を行いました。この電離箱の目的は、複合核の β 壊変の際に生成された新しい諸元素の一部から放射するものと仮定された高エネルギーの α 粒子を検知することでした。彼らは高エネルギーの α 粒子の放出を通じて半減期の短い幾種かの同位体の α 壊変を予期していました。実はここにフェルミの非常な几帳面さと系統的な考え方がはっきり見えるのです。自然に存在する α 放射能を含む物質から発生する低エネルギーの α 粒子から送られる信号はこの実験の邪魔になるので、それを除外するために彼は実験材料のウランと検出器の間に薄いアルミニウムの箔を置きました。この薄い箔が低エネルギーのバックグラウンド(背景)粒子を停止させる一方で高エネルギーの α 粒子は通過させると考えたからです。ですが実験からは期待していた結果は得られませんでした。高エネルギーの α 粒子は一つも検出されなかったのです。この実験装置は、フェルミの几帳面さが度を過ぎていなければ、核分裂生成物の検出によって核分裂自体を発見する何よりの機会でした。ですが背景放射線だけを除去する目的で配置された薄いアルミニウムの箔は高エネルギーの核分裂生成物をも停止させてしまいました。高エネルギーの α 粒子は箔を通過できたのにそれよりもっとエネルギーの高い核分裂生成物までが停止させられてしまうのは不思議だと思われるかもしれません。これは核分裂生成物(数十個の電子を失った周期表の真ん中の核の集まり)の荷電の方が α 粒子の2単位の荷電よりもずっと大きいからです。ですからこれらの核分裂生成物にはあの「粘っこい電子のスープ」がより強い制動力として作用するため飛程の距離がずっと短くなってしまうのです。実験主義者として非常に優れていたフェルミはかえってそのために電離箱での膨大な測定値によって簡単に検知できたはずの核分裂生成物を突き止める機会を逃してしまったのです。

核分裂をもう少しで発見できるところまで到達しながらできなかった優れた物理学者はフェルミだけではありません。その一人はスイスのポール・シェラー¹⁸でした[5]。彼は、フィルターは使いませんでしたが核分裂生成物がそれまでに測定された別の粒子や核子に比較してあまりにも膨大な計測値を示したために誤った解釈をしてしまったのです。彼の実

¹⁸ ポール・シェラー(Paul Sherrer, 1890~1969)はスイスの物理学者である。1927年にチューリッヒでスイス連邦工科大学(ETH)の実験物理学部の部長となり、また1946年にはスイスの原子力科学委員会の会長となった。彼の名をとって命名されたポール・シェラー研究所は、スイス連邦原子炉研究所(EIR, Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung)とヴィリゲン素粒子物理学研究所(Villigen Institute for Particle Physics)とを合併して1988年にヴィリゲンに設立された。

験はフェルミが行ったものと似ていました。トリウムに中性子を照射するとガイガーカウンターが膨大な電気パルスを表示するので、彼は機械工作所に苦情の電話をかけてこう言ったものです：

「カウンターは昨日正常に機能していたのに、今日はどこかおかしくなったらしい。膨大な量の電気パルスを計測するんだ。」

1.1.5 最初のウラン核分裂の仮説 (1934 年 9 月)

ー イーダ・タッケ-ノダック

中性子の吸収によってウラン核の壊変分裂の可能性を最初に予言したのはドイツの化学者イーダ・タッケ-ノダック¹⁹で、1934 年 9 月のことでした[11]。彼女は超ウラン元素の概念を使用したフェルミ自身の実験の解釈への強い批判を「元素 93 に関して(Über das Element 93)」という題の論文の形でツァイトシュリフト・フュール・アンゲヴァンテ・チェミー誌(Zeitschrift für Angewante Chemie)に発表しました[12]。ノダックの論文の抜粋(ドイツ語から翻訳)を図 2²⁰に記載します。彼女はフェルミのチームがウランに近い諸元素以外を除外することによって、ウラン核が周期表の真ん中の近くに位置するもっと軽い幾つかの元素に分裂する可能性を見逃したことを指摘しました。照射された実験材料を化学的な方法で分離するとチタン、ニオブ、タンタル等中くらいの重さの元素が見つかるかもしれないと主張して、彼女は次のように提案しました。



挿絵 6: イーダ・タッケ-ノダック
(1896~1978)

「重い核に中性子を照射するとその核は幾つかの大きな部分に分裂することが考えられる。これらの部分はもちろん既に知られている諸元素の同位体のはずで、照射された元素の周期表の隣りには位置しないはずである。」

彼女は化学的な分析方法でそのような諸元素を見つけることは容易だろうと指摘しました。その一方で彼女自身は自分が化学者であったにも拘わらず、自分の主張を化学的に証明するためにフェルミの実験を繰り返すことはしませんでした。また同時に物理学界は彼女

¹⁹ イーダ・タッケ-ノダック (Ida Tacke-Noddack, 1896~1978) はレニウムをワルター・ノダック (Walter Noddack) 及びオットー・カール・ベルグ (Otto Carl Berg) と共同で発見したドイツの化学者である。伝記は本書の第 2 章第 4 節を参照のこと。

²⁰ Al (アルミニウム) と Pb (鉛) は英語訳の論文の中では An 及び Ph と記載されている、これはおそらく書き間違いに由来するものだと思われる (本書の著者たちのコメント)。

のアイデアを完全に無視しました。この時点で知られていた核反応が照射された核に及ぼす影響はすべてかなり穏やかなものと考えられていたので、彼女の主張は考慮するにも値しないと考えたのです。核を壊して幾つもの部分に分裂させるにはあまりにも大量のエネルギーが必要とされるので、それをたった一つの中性子が引き起こすなどとはまるで戯言のようなものだ、というのが大方の意見でした。オットー・ハーンもこの見地を明確にして、彼女が批評を求めて彼のところに送った原稿の発表を避けるように、と彼女にはっきり忠告しました。彼はタッケ-ノダックのアイデアが全くの間違いと見做し、もし彼女が後に弁護しきれないようなアイデアを発表してしまったら彼女の研究者としての信用が失われるかもしれない、と忠告したのでした。

元素 93 について

イーダ・ノダック博士

ツァイトシュリフト・フュール・アンゲヴァンテ・チェミー誌

第 47 巻 653 頁(1934 年 9 月)

この論文は H.G.グレッツァーがドイツ語から英語に翻訳。

・・・ この沈殿物は、Ti, Nb, Ta, W, Ir, Al 並びに Si の各元素に関しては溶液中に存在していたうちのほぼ全量、Sb, Pb, Bi, Ni 並びに Co に関しては一部の量を含有していた。

・・・ この新しい(半減期 13 分の)放射性元素が原子番号 93 であるということの証明は成功にはほど遠い。なぜならフェルミはこれが他の元素である可能性を除去する方法を完全には遂行していないからである。

・・・ 重い核が中性子に照射された場合、その核が幾つかの大きな部分に割れることが考えられ、この場合にはそれらの破片は勿論照射対象の元素の付近ではないところに存在する既知の元素の諸同位体から成り立っているものと考えられる。

挿絵 7: 1934 年 9 月に発表されたイーダ・ノダックの論文の抜粋 (原文はドイツ語。本書の著者たちによる原文[61]中の An と Ph は Al と Pb に訂正してある)。英語版からの日本語訳は本書の翻訳者による

幸いなことに、彼女はハーンの忠告に耳を貸さず、論文を出版社に送りました。彼女のアイデアが議論に取り上げられなかったのは、部分的には彼女が以前に行ったマスリウム²¹を

²¹ 1925 年のマスリウムの発見は批判を受けた。最終的にはテクネチウムと名付けられたこの元素 43 はカルロ・ペリエ(Carlo Perrier)とエミリオ・セグレ(Emilio Segrè)が、モリブデンにデューテリウムを照射後化学的にこの元素を分離することによって発見した。

発見したという主張が間違っていたために彼女の物理学者としての評価が多少低下していたことに由来しています。別の情報源によると彼女はナチへの共感を示したために仲間外れにされたとも言われています。それにも増して、彼女はフランシス・ウィリアム・アストンの発表した種々の核種の質量値の不正確さの犠牲者となったのです。フェルミはノダックの提案が正しいかどうかの確認に手間をかけました。ですが、これらの不正確な質量値のため、彼は否定的な結論に達したのです。エドワード・テラーはこのことについて次のように述べています[5]：

「ノダックはフェルミへの手紙に『この多様な放射能はおそらくウラン核が二つに分裂することを意味すると思われる』と書き、これがきっかけでフェルミはこの可能性を計算したのですが、彼はこのような核の分裂の仕方は不可能だという結論に達しました。彼の計算は正確でした。たった一つの問題は、彼の計算が(アストンによる)核質量の不正確な計測値に基づいていたことだったのです。」

フェルミのローマの同僚エミリオ・セグレ²²は後に次のように書いています[13]：

「私たちに送った論文の中でイーダ・ノダックが私たちの実験の結果を一つの重核がほぼ同じ大きさの二つの部分に分裂した結果と解釈することが明らかに可能だと説明したにもかかわらず我々は核分裂の可能性を見逃してしまった。私たちにどうしてこの可能性が見えなかったのかは不明である。フェルミは何年も後になってから、当時入手可能だった質量欠損のデータが紛らわしいもので核分裂の可能性を締め出してしまったようだ、と言っていた。」

セグレは自伝[14]に次のように書いています：

「自分の研究成果の別刷りを私たちに送ってくれたイーダ・ノダックの評言にも拘わらず、私たちは核分裂の可能性を真面目に信じようとしなかった。私たちのみならずハーンやマイトナー、ジョリオット・キュリー夫妻を初めこの分野に従事していた者たちが皆どうしてこれを見逃すことができたのか、私には今日でもわからない。」

ウラン核の分裂は最終的には1938年にベルリンのカイゼル・ヴィルヘルム研究所で発見

²² エミリオ・セグレ(Emilio Segrè, 1905～1989)はイタリア生まれのアメリカ合衆国の物理学者で、1959年にオーウェン・チェンバレン(Owen Chamberlain, 1920～2006)と共に「彼らの反陽子の発見の功績」によりノーベル物理学賞を受賞した。

されて、ノダックの提案の正しかったことが判明しました。1939 年のある論文[15]の中でノダックは自分の以前の業績を述べると共に、なぜオットー・ハーンもリーゼ・マイトナーも彼らのそれぞれのウランの核分裂に関する論文に彼女の 1934 年の論文を引用しなかったのか、と訝しがりました。1946 年 12 月 13 日のノーベル賞受賞講演の際にハーンはイーダ・タッケー-ノダックの功績を公正に取り扱わなかったことを次のような表現で認めたのです[16]。

「他の方面から(イーダ・ノダックのことを指している)周期表に存在している全ての元素を除外できるまでは新元素 93 が発見されたという結論は出せない、という批判がありました。この批判は当時の原子核物理学の全ての見地と矛盾するように見えたため真面目に受け止められませんでした。」

1.2 ウランとトリウムからの核分裂生成物の検出 (1935 年～1938 年)

1.2.1 ベルリンの研究チーム (1935 年～1938 年)

ー リーゼ・マイトナー、オットー・ハーンとフリッツ・シュトラスマン

ドイツ人のオットー・ハーン²³はベルリンで仕事をしていた放射化学分野のパイオニアでした。オーストリア人のリーゼ・マイトナー²⁴は 1907 年の末にウィーンからベルリンに移りました。二人はその後 30 年以上にわたって共同の研究を行い、そのうちの 25 年以上(1912～1938)はカイゼル・ウィルヘルム化学研究所 (Kaiser-Wilhelm-Institut



挿絵 8: カイゼル・ウィルヘルム研究所の実験室での
オットー・ハーンとリーゼ・マイトナー

für Chemie (KWIC))で行われました[17,18]。ベルリン-ダーレムにあるこの歴史的な研究所は 1956 年にオットー・ハーン・bau (Otto-Hahn-Bau)と改名され、また 2010 年 10 月 27 日には新たに自由大学附属ハーン・マイトナー・bau (Hahn-Meitner-Bau der Freien Universität)と改名されています[63]。

ハーンとマイトナーの共同研究は当時としては非常に型破りなものでした。男性と女性

²³ オットー・ハーン (Otto Hahn, 1879～1968) はドイツの化学者で「重核の核分裂の発見」の功績により 1944 年にノーベル化学賞を受賞した。伝記は本書第 2 章第 6 節を参照。

²⁴ リーゼ・マイトナー (Lise Meitner, 1878～1968) はオーストリア人で、ベルリンで研究に携わった物理学者。彼女は 1938 年にスウェーデンに移住してスウェーデン国籍を取得した。彼女は核分裂に関する研究によってオットー・ハーン並びにフリッツ・シュトラスマンと共に 1966 年に受賞したエンリコ・フェルミ賞をはじめ数多くの賞を受賞している。

が同等に共同研究をしたのみならず、化学者と物理学者が一緒に研究活動を行ったからです。かれらの型破りで学際的な提携は幾つもの観点から今日の現代的な研究活動のモデルになったと言えます。幾つもの新しい放射性物質の発見、これらの物質の放射線の研究、放射性反跳や β 放射線の吸収の発見、磁気法を使用しての β 線スペクトルの測定等、彼らの共同研究は多数の功績を挙げました。彼らは時には単独で、また別の時には一緒に研究活動を行い、当時生まれて間もなかった放射線学に多くの重要な結果をもたらし、それらをもって後の原子物理学の独立分野としての確立に寄与しました。1918年に彼らはアクチノイド系列の母核で半減期の長いプロトアクチニウムという新元素を発見しました[19]。

第一次世界大戦後、1920年から1930年の間ハーンとマイトナーは放射化学と原子物理学の研究に別々に従事しました。彼らはそれぞれ化学部並びに物理学部の長となり、またハーンは後に KWIC の所長にも就任しました。中性子と人工放射能が発見されてフェルミが中性子照射による核反応を起こす実験を始めたころ、マイトナーも同様の実験を実施しました。マイトナーのイニシアティブで二人はまたこの分野で共同研究を始め、それが核分裂の発見に繋がったのでした。

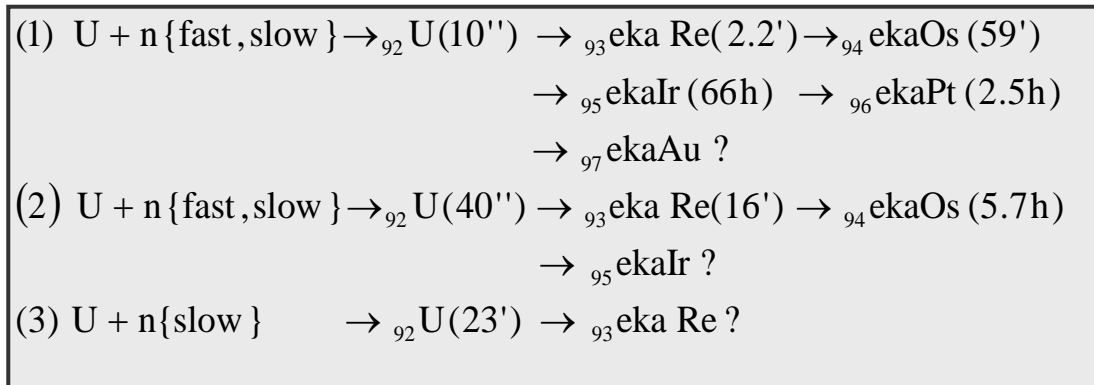
放射性核生成のフェルミの実験を追跡して再び行うすることによってハーンとマイトナーは1934年の末からウランの中性子照射の際の誘導放射能の性質、特に壊変の様式の研究に力を注ぎました。彼らは初期の4種類の β 放射能をはじめとして幾種類もの放射能を確認しました。この4種類のうちの二つは半減期があまりにも短かすぎて研究の対象にはできませんでしたが、13分並びに90分と半減期がより長い残りの2種は分離して研究することができました。自らの研究の成果並びに超ウラン諸元素は化学的には周期表の遷移元素に似ているという(不正確だったけれども)当時一般に受け入れられていた仮定に基づいて、ハーンとマイトナーはフェルミと同様にこれらの同位体が超ウラン元素93と94だと考えました。

フリッツ・シュトラスマン²⁵は1935年の半ばにこの研究チームに参加しました。1935年から1938年の間にハーン、マイトナーとシュトラスマンは更にフェルミのチームが初めに観察したよりも多い9種類の放射性生成物を確認しました。全部が β 放射体でした。この

²⁵ フリッツ・シュトラスマン(Fritz Strassmann, 1902~1980)はドイツの化学者で、核分裂の発見に至った研究の功績により1966年にオットー・ハーンとリーゼ・マイトナーと共にエンリコ・フェルミ賞を受賞した。

結果は物理的にも化学的にもウラン(Z=92)に近い元素の性質としては矛盾していて理解しづらいものでした。そのうえこのチームは、生成された物質が周期表上で原子番号 Z が最大 96 までの範囲のウラン近辺あるいはウランの後に位置するものと思い込んでいました。存在の仮定された新しい超ウラン諸元素は「エカ諸元素(eka-elements)」と呼ばれました[20、21]。超ウラン諸元素と遷移諸元素とは類似しているものという思い込みから、彼らは自分たちの発見した諸元素をエカレニウム(ekaRe)、エカオスミウム(ekaOs)、エカイリジウム(ekaIr)、エカプラチナム(ekaPt)並びにエカゴールド(ekaAu)と名付けました。彼らは、超ウラン諸元素の生成に際しては図表 1 に示されるように三種類の異なった基礎過程があるものと考えたのでした[22]。

たった一つの元素の中性子照射が 3 種類の基礎課程で超ウラン元素を生成するというのは驚くべきことでした。同様な観察が後にトリウムの中性子照射の際にもなされました。



図表 1: マイトナー、ハーン並びにシュトラスマンが 1934 年から 1938 年の間に 3 種類の異なった反応過程から生成されたとした超ウラン諸元素。「fast」は高速、「slow」は低速を意味する

1936 年 3 月にはさらにもう一つ半減期が 23 分の放射能が発見されました。これは図 3 の 3 番目の過程(3)によって ${}^{238}\text{U}$ が中性子を一つ共鳴捕獲して生成されるウラン同位体 U-239 に由来するものだと解釈されました。また、マイトナーは全三種類の反応で作用するのは同位体 U-238 だと提案しました。(天然のウランは 99.3%U-238 同位体から成り立っています)。同様にしてトリウムに中性子照射したときに観察される半減期 33 分の物質も中性子捕獲に伴って生成された新しい同位体だと解釈されました[21]。こうして 1938 年の末までに超ウラン元素の存在を主張する論文が全部で 14 種類も発表されたのでした。

今日私たちはフェルミのチームと同様、ベルリン研究チームの観察した放射能性物質は一つを例外として残りは超ウラン諸元素ではなく核分裂に由来するものだというを知っています。この洞察に達する前に、ハーンはある機会に 1934 年から 1938 年にかけての

研究を指して「ウラン・プロジェクト」と呼び、この期間の出来事は「まさに悲劇的とも言える」と述べました[18]。マイトナーも後に次のように認めています[17]。

「・・・これらの結果(ハーンがバリウムを核分裂からの生成物として発見したことを指す)が科学に全く新しい途を開いたのだということ、そしてまた私たちの以前の仕事が間違っていた脇道に嵌まってしまっていたということも私にははっきり分かった」。

実際には彼らは超ウラン元素も一つながら発見しており、半減期 23 分の放射性生成物が同位体 ^{239}U だとしたことについては彼らの解釈は正しいものでした。彼らはまたこの放射性物質は β 壊変によって超ウラン元素 93 に変換すると提案しました[21]。ですが、彼らはこの元素は既に以前の実験によって発見されたものと考えたためこの物質を確認することには力を注ぎませんでした。

元素 $Z=93$ の存在がやっと証明されたのは 1940 年の春でした。この当時には既に何百種類もの放射性核分裂生成物が確認されており、これらの調査が主流になっていて、超ウラン元素は焦点外でした。エドウィン・M・マクミラン²⁶とフィリップ・ハウゲ・アーベルソン²⁷は、サイクロトロン装置を用いてベリリウムを 16MeV のデューテリウムのイオン(重水素の核、 ^2H)で照射して生成される高エネルギーの中性子を天然のウランに照射しました。最初の超ウラン元素、つまりウランよりも重い元素を検出してネプツニウム(^{239}Np , 半減期 2.3 日)と命名したのはこの人たちでした[23]。実を言えばネプツニウムは 8 MeV のデューテリウム加速器を中性子源として似たような実験を行ったマクミランが既に 1939 年に生成していました。彼はこの時に二種類の異なる反応生成物を観察しました。一つは反応後に大幅に放射性物質が反跳するもの、つまり核分裂生成物。もう一方の種類は反跳はしません半減期が(^{239}U と同等の)23 分、並びに半減期が約 2 日の放射能から成り立っていました。マクミランとアーベルソンが 2.3 日の半減期の ^{239}U の壊変からの β 壊変反応生成物を、ウランと化学的に非常によく似ていることに基づいてそれが原子番号が 93(ネプツニウム—

²⁶ エドウィン・M・マクミラン(Edwin M. McMillan, 1907~1991)はアメリカ合衆国の研究者で、「超ウラン諸元素の化学に関する発見」の功績によりグレン・テオドル・シーボルク(Glenn Theodor Seaborg, 1912~1999)とともに 1951 年ノーベル化学賞を受賞した。

²⁷ フィリップ・ハウゲ・アーベルソン(Philip Hauge Abelson, 1913~2004)はアメリカ合衆国の物理学者で、1939 年に合衆国の研究者の中で最初に核分裂の発生を確認した者の一人である。彼は 1940 年、エドウィン・マクミランとともにバークレイ放射能研究所(今日のローレンス・バークレイ国立研究所)でネプツニウムを発見した。

239)の本物の超ウランだということを正確に説明できるまでには一年かかりました。ネプツニウム—239 は不安定な元素で天然には存在せず、 β 壊変を通じて 2.3 日の半減期でプルトニウム—239 に変換されます。

1.2.2 半減期 3.5 時間の新たな核種の発見 (1937 年～1938 年)

ー イレーヌ・ジョリオット - キュリーと P.サヴィッチ

中性子照射を受けたウランからの β 放射能がなぜこんなに多様なのかは長い間謎とされてきました。1935 年から 1938 年の間ベルリンの研究チームと並行してイレーヌ・キュリーとパヴレ・サヴィッチ²⁸もパリのラジウム研究所で中性子の照射を受けたトリウム並びにウランからの放射性生成物の検出に従事していました。ベルリンのチームは超ウラン元素が含まれていると想定した硫化物だけを検査して、別の可能性である濾過液²⁹の方は調査しませんでした。

パリの研究グループはハーンやマイトナーとは違い、ウラン生成物を分離せずにそのまま分析できる方法を採用しました。1937 年の末に彼らは半減期が 3.5 時間で強力な新しい β 放射能の観察を通して驚くべき結果に到達しました[24]。彼らはハーンやマイトナーのように白金を使用した分離方法で放射能を帯びたこの元素を超ウラン諸元素から分離することはせず、代わりにランタンを使用する方法を用いたのです。イレーヌ・キュリーは最初 1937 年 8 月に発表した論文[24]の中でこの物質はトリウム(原子番号 90)の同位体の一つであると提案しました。1938 年 1 月、ベルリンの研究チームは濾過液をも分析してトリウムの存在を実証しようとしたが見つけれられず、また、それ以外の元素を探索することはしませんでした。トリウムを見つけれなかったため実証は失敗に終わったことを彼らはパリの研究グループに手紙で報告しました[17]。その後の 1938 年 3 月、イレーヌ・キュリーは半減期 3.5 時間の放射性物質が、彼女がアクチニウム(原子番号 89)と仮定したあるランタン担体に伴って移動することに気がつきました。ですが彼女の研究チームはどうしてもこの物質をランタンから分離することができませんでした。ですから彼らはこの物質を化

²⁸ パヴレ・サヴィッチ(Pavle Savić/P. Savitch, 1909～1994)はセルビア生まれの研究者で、1935 年から 1939 年の間ラジウム研究所で研究に従事した。(彼は最初フランス政府からラジウム研究所に 6 か月訪問のための奨学金を取得し、それが計 4 年に延長されたものである)。彼はベルグラード近郊のヴィンチャ(Vinča)に核科学研究所を設立してその初代所長に就任し、また 1971 年から 1981 年までセルビア学芸アカデミーの会長を務めた。

²⁹ 濾過液(filtrate)とは酸性の H_2S 内で超ウラン元素の沈殿後に残る溶液のことを指す。

学的性質がランタンによく似た超ウラン元素であろうと考えました。1938 年 9 月にフランスの科学誌コント・ランデュ(Comptes Rendus)に発表した「ウランの中性子照射時に発生する半減期 3.5 時間の放射性物質の性質について(*Sur la Nature du Radioélément de Période 3.5 Heures Formés dans L'Uranium Irradié par les Neutrons*)」[25]という論文に次のような一節が含まれています。

「私たちはウランの中性子照射の際に化学的には希土類に類似した半減期 3.5 時間の放射性物質が生成されることを実証した。今後の課題はこの物質 $R_{3.5h}$ を突き止めることである。アクチニウム(Ac)は「底」(テール)、つまり分留の終期に集められるため、 $R_{3.5h}$ は「上面」(ヘッド)、つまり分留の初期に集めることによって分離できる。この物質は、他の既に知られている超ウラン元素とはあまりにも性質が違っているため超ウラン元素とは言えないようで、そのことが解釈を難しくしている。」

実のところ、これは数か月後にハーンとシュトラスマンが検出したバリウムと同様、核分裂生成物の一つで周期表の真ん中に位置する元素第 57 番のランタンでした。ここで再びこの時代の指導的立場の研究者たちの考え方を理解するうえで興味深い事実が出現します。イレーヌ・キュリーは、実験で生成されたのはランタンだったというのは可能な解釈の一つだと考えてそれをハーンとマイトナーに知らせましたが、二人ともこの主張は明らかな間違いだとして論文を発表しないようにと強く忠告したのです[62]。幸いなことにイレーヌ・キュリーは以前のイーダ・ノダックと同様この忠告を聞き入れず、共同執筆者たちと共に 1938 年 10 月ジャーナル・ド・フィジーク・エ・ル・ラジウム(*Journal de Physique et le Radium*)に発表した論文の中で実験を詳細に記述して半減期 3.5 時間の放射能壊変の曲線を添付しました。論文の一節は次のように書かれています[26]。

「(半減期)3.5 時間の物質の性質はランタンと同様であり、ランタンからは分留によって分離できない。もしこの物質が超ウラン元素だとすれば、それは化学上の性質に異常な不規則性をもたらすことを意味している。」

この観察は、ハーンとシュトラスマンが中性子を照射したウランの残渣物の中にバリウムを認めたときの観察と同じものであり、これをもってイレーヌ・キュリーは核分裂の発見者の一人としての立場を得ていたのです。ですが彼女の研究結果はこの論文によって知られたものではありません。観察したものがランタンだと著者たちが完全に確信していたことが論文にははっきり表現されていないことがその原因かもしれません。また、イレーヌ・キ

キュリーがハーンとマイトナーから受け取った否定的な批評が示すように、当時の学界はこのような革命的な考え方を受け入れるところまで成熟していなかったことももう一つの原因として挙げることができるでしょう。ともあれキュリーとサヴィッチは彼らの実験を通して核分裂の発見へと導く重要な前進の一步を成し遂げたのでした。

1.2.3 バリウムが核分裂生成物の一つであることの発見（1938 年）

ー オットー・ハーンとフリッツ・シュトラスマン

イレーヌ・キュリーが実験を通してランタンを発見したことを聞いたベルリンの研究チームはこの半減期 3.5 時間の同位体を「キュリオスム」と呼びました。彼らはフランスの研究チームが実験材料の何らかの汚染のせいで間違った結論に達したのだらうと思ったのです。これと同時期に、ある重要な出来事がベルリンの研究チームの分裂をもたらして、事態の進展に決定的な役割を果たすこととなりました。リーゼ・マイトナーが劇的な状況の下でベルリンからの逃亡を余儀なくされたのです。彼女はユダヤ人の家庭の出身で、1935 年の反ユダヤ人的な諸法律の採択後、ドイツではユダヤ人たちの状況が急激に複雑化しました。マイトナーは改宗者だったにも拘わらず、ドイツ法下ではユダヤ人と分類されました。それでも彼女はオーストリア国籍でしたからこのことは当面は大した脅威にはなりませんでした。しかしドイツがオーストリアを「政治的経済的に併合(Anschluss)」したことにより状況が一変しました。この結果リーゼ・マイトナーは自動的にドイツ国民となり、彼女のオーストリア発行の旅券が無効になってしまったのです。このため彼女は 1938 年 7 月 13 日ナチのユダヤ人迫害を逃れるために急遽ドイツから不法出国し、コペンハーゲン経由でベルリンからストックホルムに逃れたのでした[17]。

キュリーの論文は 10 月号のジャーナル・ド・フィジーク・エ・ル・ラジウムに発表されました。ハーンはさっと目を通してただで内容に何も新しいものはないと判断し、それをシュトラスマンに送りました。論文を読んだシュトラスマンは、半減期が 16 分の放射能に比べると相対強度が 1 : 2 と半減期 3.5 時間の放射能の方が非常に強いものであることに注目しました。この時点で彼はこれが実験材料物質の汚染のせいだとするには強すぎることを理解しました。そこでベルリンの研究チームはキュリーが観察したのと同様の反応生成物を検知する目的で彼女の実験を繰り返しました。1938 年 11 月にハーンとシュトラスマンは化学的にはバリウムと同様の核種を少なくとも 3 種類発見しました。ウラン近辺の諸元素を調査した結果、彼らは唯一の可能な解釈はラジウム(原子番号 88)だという結論に達しました。ハーンは 11 月 2 日に当時ストックホルムに避難していたマイトナーに次のように書いています[17]。

「これがアクチニウムに壊変する数種類—2,3 種類—のラジウム同位体に関係しているようだという事を私たちは今や殆ど確信するに至りました。」

ハーンはラジウムが、ウランが中性子を捕獲した後の 2 段階の α 壊変 (${}_{92}\text{U} + \text{n} \rightarrow {}_{90}\text{Th} \rightarrow {}_{88}\text{Ra}$) によって生まれたものだと提案しました。ですが、低速の中性子が 2 段階の α 壊変を引き起こすというのはあまり起こりそうにないことで、その上、それまでに観察されたこともありませんでした。ハーンとシュトラスマンは自分たちの実験の結果を 1938 年 11 月 8 日にナチュールヴィッセンシャフテン(Naturwissenschaften)誌に送り[27]、その中でラジウム異性体三種類とアクチニウム異性体三種類とを挙げました。しかしながら彼らはウランを使用した時とトリウムを使用した時では実験の結果に基本的な違いのあることに気がつきました。高速の中性子はトリウムだけと反応したのに対し、低速の中性子はウランとより効率的に反応したのです。

1938 年 12 月の初めにハーンとシュトラスマンはラジウムの存在の実証を試みました。シュトラスマンはこの疑惑対象の「人工の」ラジウムを化学的に分離するために新たな別の方法を提案しました。以前にマリー・キュリーも部分的に提案していた四段階にわたる分離方法が導入されました。この過程の概要は第 4 図に示されています[28]。この四段階の方法によるとラジウムとバリウムの完全な分離が可能なはずでしたが、分離されたバリウムには何回実験を繰り返しても人工のラジウムがどうしても混じってしまいます。この結果に困惑した彼らは、事態を解明する最後の手段としてさらにもう一つの方法を採用して、分析材料の一つにごく少量の別の半減期が 200~300 時間という寿命の長いラジウム同位体、Ra-IV,を混入し、その後に四段階方式の過程を実行してみました。分離後、天然の放射性の同位体はガイガー・ミュラー・カウンターの検出することが可能でした。計測の結果、天然の同位体が分離された諸元素と一緒に存在しているのに対して、「人工の」ラジウムの方はバリウムと一緒に存在していることが確かめられました。こうなれば、「人工の」ラジウムはバリウムに似ているだけではなく、バリウム(原子番号 56)そのものだという事を認めざるをえません。このことにより、ウランに中性子を照射するとウランから周期表上ではかなり離れた位置の元素が生成されることが事実として認められたのでした。

ハーンはこの「バリウム・ファンタジー」のことをマイトナーに伝えました。1938 年 12 月 19 日の彼女宛ての手紙に彼は次のように書いています[17, 18]。

「この三種の(ラジウム)同位体の検知はかなり正確で、バリウムを除く他の全ての元素が

らの分離が可能でした……。しかしながら私たちはどうも、私たちの Ra-諸同位体がラジウムではなくてバリウムのような反応の仕方をしているという何とも驚くべき結論に着実に近づいているようです……。他の全ての元素、超ウラン元素、U, Th, Ac, Pa, Pb, Bi や Po などは全くの論外です。シュトラスマンと私はこのことを今のところはまずあなただけに知らせることにしました。あなたは何か他の素晴らしい説明を思いつくかもしれませんから。私たち自身はウランが分裂してバリウムが生成されるようなことはないことを知っています。当面は、「ラジウム」に由来するアクチニドの諸同位体がアクチニウムではなくてランタンのような反応の仕方をするかどうかを確かめるつもりです……。つまり、原子の質量が 137 よりもずっと多いバリウムの同位体の存在の可能性を考えてみてくれませんか？」

バリウム発見のこの最初の知らせがストックホルムのマイトナーに届いたのは 1938 年 12 月 21 日でした。彼女は即座に次のように回答しました。

「あなた方のラジウム実験の結果はとても興味深いものです。低速の中性子との反応がバリウムの生成につながるとはね！ところで、あなたたちは、ラジウムの諸同位体がアクチニウムよりも周期表で前に位置することを確認できますか？現在の時点ではそのような分裂の想定は私には理解し難いのですが、核物理学の分野ではこれまでも驚くような出来事が何回も起こっていますから、それが全く不可能とは言いきれませんね。」

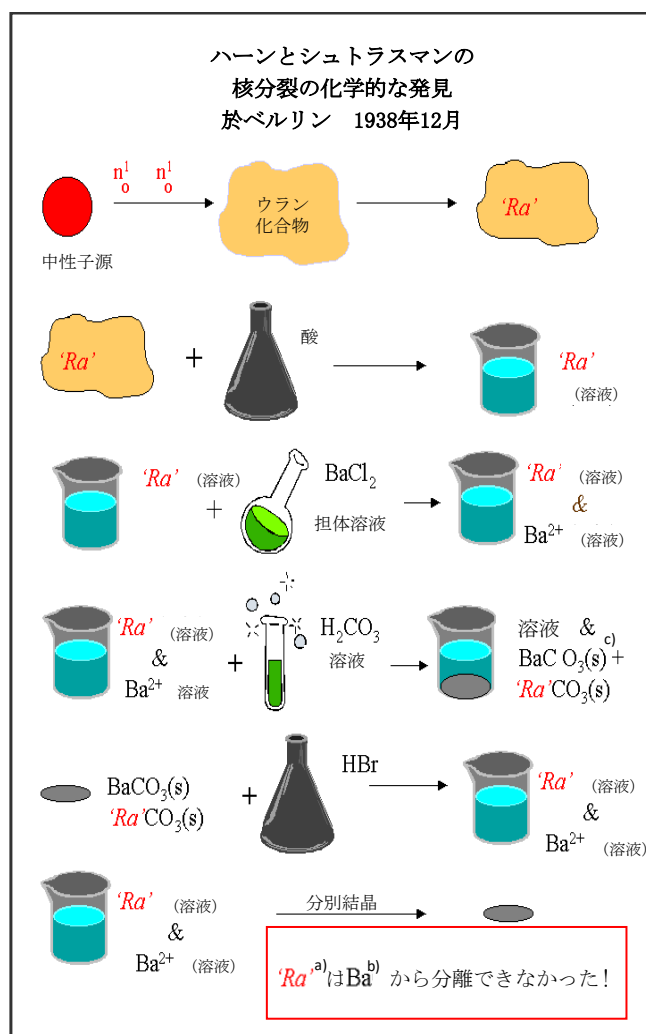
放射化学的には明らかなこの証拠にもかかわらず、ハーンは自分たちの実験の結果に確信が持てませんでした。この時点では彼は未だにウラン核が二つに分裂することを洞察していなかったのです。当時の物理学者たちは、一つの重元素がバリウムのように軽い元素に変換することはないと考えていたのです。ウラン核から 2 個の α 粒子のかたちで 4 個の陽子を放出させてラジウムを生成することは可能と考えられていました。しかしウランをバリウムに変換させるには中性子が 100 個もの粒子を放出させなければならないことになります！これはどう見ても不可能と思われました。その一方で、ハーンは自分の化学分析の結論には確信を持っていました。12 月 21 日にハーンはマイトナーにこう書きました[17]。

「私たちの実験の結果は、たとえそれが物理学の見地からは不合理かもしれないとしても、隠しておくわけにはいきません……。この窮地から抜け出す途があなたには見えますか？」

ハーンとシュトラスマンは1938年12月22日にバリウムの発見に関する論文を公表するために送り出しました。この歴史的な論文は1939年1月6日ドイツのナチュールヴィッセンシャフテン誌に「ウランの中性子照射に由来するアルカリ土類諸元素の存在と性質について (*Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle*)」という題で掲載されました[29]。彼らは三個のバリウム同位体及びそれらの半減期を検知しました。彼らはさらにこれらの検知された生成物の壊変をも研究しました。もしもこの元素がバリウムであったならその「子供の産物」はランタンのはずで、これもまた実証されました。このため、彼らの以前の論文で取り上げたアクチニウムの諸同位体はランタンと書き換えなければなりません。この論文の中で彼らは次のような文章を付記しています。

「我々が考えていた『ラジウムの諸同位体』はバリウムと同じ性質を保っている。従って我々は化学者としてこれらの新たな反応生成物はラジウムではなくバリウム自体であると言わざるを得ない。ラジウムとバリウム以外の他の諸元素はここでは論外である。・・・我々が『ラジウムの諸同位体』と呼んでいる物質がラジウムではないとすれば、『アクチニウムの諸同位体』もアクチニウムではなくてランタンでなければならない。」

そうだとすると、一つの純粋なウラン(原子番号 92)の実験素材は中性子の照射後にバリウム(原子番号 56)を含有していることになります。一方で、バリウムはウラン核の分裂に由来するものと言えませんが、この反応は次のように書くことができます。



図表2: オットー・ハーンとフリッツ・シュトラスマンが施行して核分裂生成物としてのバリウムの発見に繋がった化学分析。a)ラジウム、b)バリウム、c)固体(solid)。



このように、ウラン核は質量が増加するどころかむしろ二つに分裂してしまうのです。しかしハーンとシュトラスマンはこの時点では核分裂が起こったことを理解していませんでした。バリウムの発見を物理的な視点から説明することがあまりにも困難だったので、ハーンは化学的視点からの確信と物理的視点からの不可能性との板挟みになりました。そこで彼は論文の原題を書き換え、「ラジウム」を「アルカリ土類諸金属」に置き換えました。二日後に彼はウラン核が分裂したかもしれないという可能性に思いあたりました[18]。ウラン核は分裂が可能で、これまで超ウラン元素と仮定してきたものが実のところは軽元素だったのに違いない、と彼は推察しました。ですが彼はここで一つ間違いを犯して原子番号の代わりに質量数を考慮してしまい、論文に次のように書き加えました。

「バリウムとテクネチウムの質量数の和は $138+101$ で 239 となる！」

ハーンとシュトラスマンは自分たちの主張に関しては明らかに非常に注意深く控えめでした。このことは彼らの使用した検知方法がまだすべては実行されていなかったことにもよりますが、物理学的な視点からして物議をかもしそうなものだったということにもよるものと思われます。論文の中では次のような表現が使用されています[29]。

「我々は化学者としての立場からどう見ても上記の壊変系列を修正して *Ra*, *Ac* や *Th* の代わりに *Ba*, *La* 及び *Ce* という諸記号を書き込むべきである。しかしながら我々は「核化学者」として物理学との境界に非常に近いところでの研究に従事しており、現在のところはまだこれまでの原子核物理学に反するような仕方で劇的に足を踏み出すことはできない。一連の稀な偶然の一致が我々に誤った兆候を示した可能性も否定できない。」

暫く後に、ハーンとシュトラスマンはトリウムの核分裂の際にもバリウムを検出しました。つまり、彼らはトリウムの核分裂も観察したのでした。1939年1月10日付のマイトナーへの手紙にハーンは次のように書いています[17]。

「私たちがトリウムから見出したラジウムもバリウムだったようです！私たちの行った実験がこのことを間違いなく示しています・・・なぜバリウムが出現するのか私には理解できません。」

1月23日にハーンとシュトラスマンは実験中にストロンチウムとイットリウムを検出しました。1月24日に彼らはネイチャー誌への投稿予定のマイトナーとフリッシュからの原

稿を受け取りました(次節 1.3 を参照のこと)。1 月 28 日、ハーンとシュトラスマンは自分たちの最新の研究結果をナチュールヴィッセンシャフテン誌に送り、それが 1939 年 2 月 10 日に掲載されました[30]。彼らはその中でウランとトリウムの核分裂の際にバリウムの諸同位体が生成されることを確証しました。彼らはまたストロンチウム(原子番号 38)、イットリウム(原子番号 39)の同位体並びに不活性ガスのクリプトン(原子番号 36)等他の元素も検知されたと記述しました。

ウランの原子核は非常に安定しています。天然のウランは次の三種類の同位体から成り立っています。半減期が(太陽系の年齢と同じ!)45 億年の U-238 が その 99.28 パーセントを占め、半減期が 7 億 4 百万年とそれよりかなり短い U-235 が 0.71 パーセント、そして半減期 24 万 5 千年の U-234 が残りのごく僅か(0.0054 パーセント)を占めています。太陽系が生まれたときにはこれらの全ての同位体はどれも同じぐらいの割合で存在していたわけで、現在の天然ウラン中の同位体の割合の相違はこれらの同位体の半減期の違いを反映しています。バリウムのウラン核分裂生成物としての発見は原子核物理学界に衝撃を与えました。たった一つの中性子がウランの核に帆走して爆発的な壊変を引き起こせるとは誰も思ってもいなかったからです。

1.3 核分裂と連鎖反応（1938 年～1939 年）

1.3.1 核分裂の最初の解釈（1938 年のクリスマス）

ー リーゼ・マイトナーとオットー・フリッシュ

以前にも述べたように、マイトナー自身はイレヌ・キュリーの研究チームが中性子の照射を受けたウランの中に軽元素のランタンを発見したという事実を受け入れ難く思いました。他の物理学者たちと同様、彼女ももっと小規模な核変換以外を考えることは難しかったからです。ですから、彼女はバリウム発見の最初の知らせをハーンから受け取るとそれを何度も読み直して熟考しました。その後彼女は、超ウラン元素の考えは間違っているかもしれない、という考えを受け入れてもよいと考え直しました[17]。



挿絵 9：リーゼ・マイトナーが 1938 年にクリスマスをおくしたクングスエルヴ市ロングガータン通りのウッドマン邸。この屋敷は最近欧州物理学会(The European Physical Society)から「EPS の歴史的建築物」に指定された。指定は 2016 年 10 月 29 日にスウェーデン物理学者協会の会議「物理の日」に発表された。上の左下の写真は、この屋敷の外壁に掛かっている「EPS の歴史的建築物」指定の標識。

リーゼ・マイトナーがこの洞察に達したのは、彼女が 1938 年にスウェーデン国イエーテボリ市の郊外のクングスエルヴという場所にある友人のエーヴァ・フォン・バールーベルギウス³⁰一家を訪れてクリスマスの休暇を過ごした時のことです。クリスマスの直前にはコペ

³⁰ エーヴァ・フォン・バールーベルギウス(Eva von Bahr-Bergius, 1874～1962) はスウェーデ

ンハーゲンからリーゼ・マイトナーの甥のオットー・フリッシュ³¹もここに到来しました。訪問第一日目の朝、彼は自分の伯母が、12月19日付のハーンの「バリウム・ファンタジー」の手紙を読み耽っているのを見ました。フリッシュは、彼らが核分裂の過程を認識し始めた1938年クリスマスの雪の中でのこの有名な散歩³²について、数年後に次のように述べています[31]。

「私たちは雪の中を行ったり来たりして散歩した。私はスキーを履いて、彼女(マイトナー)は徒歩での散歩だった … 散歩の間に、これはどうも核から幾つかの素粒子をもぎ取るとか核を「割る」とかいう問題ではなく、むしろ核は一滴の液体のようだとするボーアのアイデアを取り入れて、核が自ら細長くなって終いには分裂するといった方が説明し易いという考えが湧いてきた。その後、私は核の電荷がどのように表面張力を低下させるかに注目

It seems therefore possible that the uranium nucleus has only small stability of form, and may, after neutron capture, divide itself into two nuclei of roughly equal size (the precise ratio of sizes depending on finer structural features and perhaps partly on chance). These two nuclei will repel each other and should gain a total kinetic energy of *c.* 200 Mev., as calculated from nuclear radius and charge. This amount of energy may actually be expected to be available from the difference in packing fraction between uranium and the elements in the middle of the periodic system. The whole 'fission' process can thus be described in an essentially classical way, without having to consider quantum-mechanical 'tunnel effects', which would actually be extremely small, on account of the large masses involved.

After division, the high neutron/proton ratio of uranium will tend to readjust itself by beta decay to the lower value suitable for lighter elements. Probably each part will thus give rise to a chain of disintegrations. If one of the parts is an isotope of barium⁶, the other will be krypton ($Z = 92 - 56$), which might decay through rubidium, strontium and yttrium to zirconium. Perhaps one or two of the supposed barium-lanthanum-cerium chains are then actually strontium-yttrium-zirconium chains.

挿絵 10: 核分裂に関する最初の発表—1939年2月11日ネイチャー誌に掲載されたマイトナーとフリッシュの論文からの抜粋。日本語翻訳は本書の翻訳者による。

ンで物理学の博士号を最初に取得した四人の女性のうちの一人である。

³¹ オットー・ロベルト・フリッシュ (Otto Robert Frisch, 1904~1979) はオーストリア生まれの英国の物理学者である。1938年から1939年にかけてコペンハーゲンの理論物理学研究所 (Institute of Theoretical Physics, 今日のニールス・ボーア研究所) に勤務した。オットー・フリッシュとリーゼ・マイトナーは世界で最初に核分裂過程に物理学的な視野からの解釈を与えた。またオットー・フリッシュはまた核爆弾の爆発のメカニズムを初めて理論的に説明した1940年3月の有名なフリッシュ・パイエルス覚書の共著者でもある。

³² この歴史的な雪の中の散歩が正確にいつなされたかについては多少の不確かさが存在している。大半の文献は1938年のクリスマス・イブと指摘している。フリッシュ自身は「このクリスマスの休暇中私たちは2~3日を共に過ごしました」と回想している。二人が宿泊したクングスエルヴのロングガータン通り沿いの家(上の写真を参照のこと)の表示板には彼らがこの概念の展開を継続したのは1938年12月30日から31日にかけてであったと書かれている。

し、この表面張力が原子番号 $Z=100$ のあたりでゼロになるため、ウランに対してはかなり小さくなることを発見した。」

謎が解明されてハーンとシュトラスマンの実験で正確に何が起こったかを理解したのはまさにこの時だったのです。マイトナーとフリッシュは諸々の重核にボーアの液滴模型を適用しました。これらの核は複数の陽子と中性子を含んでおり、陽子は電気力によって互いに反撥しますが核自体はそれよりさらに強いいわゆる強い相互作用、つまり陽子と中性子双方を引き付ける核力によって一体の状態を保持しているのです。核表面の中性子や陽子には外側には隣の粒子がありませんから核により強く引きつけられます。このため水滴と同様、一種の表面張力が形成されて、これが核の結合に重要な役割を果たしています。

中性子と陽子の混じり方が「最適の」混合ではない重核の表面は完全な球形ではなく、(葉巻煙草に似た)変形した楕円形です。この核に外から追加した中性子が結合エネルギーの形でエネルギーを添加して核を励起すると、この形の変形がますます大きくなり、しまいには電気力と強い相互作用(結合力)との間に表面張力の減少を含むバランスの崩れが起こり、これらの諸力の再分配に至ります。電氣的な力はこの葉巻煙草をますます細長くしようとするため、真ん中が収縮することによって二つに分かれ(scission と呼ばれます)、その後諸々の強い力と表面張力によって終いにはより小さな「滴」が二つ生成されるのです。

こうしてマイトナーとフリッシュはボーアの液滴模型の用語を用いて核分裂の過程を説明したのでした。中性子を吸収すると、ウランの核は不安定になります。この励起状態の不安定な核はほぼ同じ大きさの二つのより小さい核に分裂します。この二つのより小さい核に分裂した後、クーロン反撥力がこの二つの間に働き、これらの核を非常に高速の運動エネルギーを持つまでにまで加速します(核分裂生成物が「反跳(recoil)」するとも言います)。質量欠損の公式を空で暗記することのできたリーゼ・マイトナーはこの質量欠損の規模を見積もり、核分裂によって生成された双方の分裂片の質量の合計と元々のウラン核の質量の差は陽子一つの質量の約 5 分の 1 に相当すると見積もりました。アインシュタインの公式 $E=mc^2$ に拠れば、核分裂過程は 200MeV^{33} のエネルギーを解放することになります。

デンマークに戻ったフリッシュは、1939 年 1 月 8 日にネイチャー誌への掲載を意図した

³³ 核分裂過程の質量欠損は核分裂生成物の運動エネルギーに変換され、それがさらには熱に変換される。

告知の下書きをマイトナーに送りました[17]。フリッシュはコペンハーゲンで彼と同じ研究所の微生物学実験室で放射性諸同位体を用いた追跡方法の研究をしていたウィリアム・アーノルド³⁴に「一つの細菌が二つに別れる過程はなんと呼ばれるのですか？」と訊きました。アーノルドの答えは「二体分裂(binary fission)」でした。これを聞いたフリッシュはウラン核の分裂をすべて「核分裂(fission)」と呼ぶことに決めました[17,31]。彼はマイトナーと共著の「中性子によるウランの壊変：新種の核反応」という題の論文を1月16日ネイチャー誌に送り、このことによって核分裂についての最初の物理学的な説明が1939年2月11日に掲載されたのでした[32]。この論文の抜粋は第5図に見ることができます。彼らの説明は次の通りです。

「ウラン核の分裂後、その中性子と陽子の高い比率は β 壊変によってもっと軽い核内の関係に相当するより低い比率へと調整されて行く。おそらくはこの双方の核分裂生成物は壊変の連鎖(壊変系列)を引き起こすものと考えられる。」

核の大きさの関数としてのこれらの陽子と中性子の間の関係は、注目に値します。前にも述べたように原子核は陽子の間の反撥的な電気力に対抗する核子間の強い相互作用によって結合されています。この二つの力には根本的な相違があります。クーロン反撥力は陽子間の距離が増加するにしたがって弱くなりますが、ぎっちり詰まった核内ではどの陽子もすべて残りの陽子からの力に影響されています。一方で強い相互作用の方は力の到達距離が限られており、相対的には一定の短い距離を超えると突然に消えてしまいます。このため実際には陽子も中性子も最も近い隣同士からの強い相互作用だけに影響されることとなります。軽い原子核なら中性子と陽子の数がほぼ同じというだけでこの強い相互作用がクーロン反撥力に対抗することができますが、核の大きさが増してくるに従って中性子と陽子がこの比率を保とうとすると電気力の方が強い相互作用よりも大きくなってしまいます。これらの強い相互作用と電気力がバランスを保って核を安定させるためには中性子の方が陽子よりも多くなくてはならず、またこの中性子の余剰は核の大きさ(質量数)が大きくなるにつれて増加しなければなりません。

³⁴ウィリアム・アーチボールド・アーノルド(William Archibald Arnold, 1904～2001)はアメリカ合衆国の生物学者で光合成を数々の面から解明した。1938年から1939年にはジョルジュ・ド・ヘヴェシー(George de Hevesy, 1943年にノーベル賞を受賞)の門下でコペンハーゲンの理論物理研究所にロックフェラーの特別奨学金受給者として研究に携わった。

ですが、分裂後にウランの核のほぼ半分の大きさの核分裂生成物が二つ出現するとすれば分裂後の核に過剰の中性子が存在する必要はなくなります。余剰の中性子を減少させるには二つの方法があります。一つは β 壊変で、この場合には中性子一つが陽子一つ(並びに核を離れる電子一つと反中性微子一つ)に変換されます。核分裂生成物の β 壊変は原子炉で燃焼した燃料のあの高強度な放射能の源の一つです。ですが、 β 壊変は通常(燃焼した燃料の中に生成される超ウラン元素には非常に多い) α 壊変よりも半減期が短く、200 年後にはほぼ消滅します。

余剰の中性子を取り除くもう一つの方法は、核分裂過程自体の中でこれらを除去してしまうことです。これも実際に起こります。核分裂過程は二つの核分裂生成物以外に複数のいわゆる即発中性子(prompt neutrons)の生成を引き起こします。この即発中性子の数は統計の法則によって決まり、ゼロと 8 個の間ですが、ウランと低速中性子とが引き起こす核分裂の際には 2~3 個であるのが普通です。これらの中性子はそれぞれが 1MeV から最大で数 MeV のエネルギーを保持しています。核分裂の際の中性子の放出はまさにシラードが彼の連鎖反応のアイデアに必要としていたもので、このため、この現象は核分裂に非常に重大な意義を持っていました。ですが、それが認識されたのはもう少し後のことで、この年の新年の最初の 1 週間の間はこのことはまだ知られていなかったのです。

本筋から逸れますが、どちらもともかく平和的な核エネルギーの使用に大きな意味を持っているので興味を惹く事柄として次の二つのことに触れておきましょう。一つは核分裂の最終生成物、つまり元の核の半分の重さの核二つ(核分裂によって生成された両分裂片)とこの状況下では比較的軽い 2~3 個の中性子とを比べると、二つの重い核の方が核分裂エネルギーの約 95 パーセントに相当するエネルギーを持っているということです。これは簡単に見過ごせる事柄ではありません。以前にも述べた通り、反応の生成物が二つだけの場合には、エネルギーの保存と運動量とに関する力学の法則によれば、いつでも一番軽い粒子が大半のエネルギーを取得します。例えば、デューテリウムの核一つとトリチウムの核一つの核融合の場合には、最終生成物は α 粒子一つと中性子一つになります。 α 粒子は中性子の 4 倍の重さなので中性子の方が全反応エネルギー 17MeV のうちの 14.1MeV を取得します。核分裂の場合はこの反対です。その理由は、核分裂の場合には二つ以上の物体が作用するにもかかわらず、エネルギーの保存と運動量保存の二つの条件はしかないからです。粒子の数が増えると、これらの二つの条件は幾つもの違った形で満たされます。こうなると、エネルギーが反応の最終生成物の間にどのように分配されるかには、もう一つの要因が絡んできま

す。核分裂の場合には核分裂生成物が荷電した陽子の間の電気力によって反撥されること
が決定的な状況となる一方で、中性子はこのような力を感じることなく、核分裂の双方の分
裂片が加速する間にそこからただ「蒸発する(evaporate)」だけなのです。

核融合過程と核分裂過程はどちらも人間が影響を及ぼすことのできない自然の法則によ
って起こるものです。核分裂の際のエネルギーの分配、つまり解放されたエネルギーの大半
を核分裂生成物が持ってしているということも、我々人間が影響を及ぼせない幸運な偶然
と見做してよいでしょう。幸運、というのは少なくとも次のような二つの理由からです。一
つには、核分裂が起こる際にこの巨大な規模のエネルギーが熱の発生という形をとるから
です。それぞれが約 100MeV のエネルギーをもって飛散する核分裂の生成物は大半の電子
を失って高多価にイオン化します。これほど高多価にイオン化した諸粒子は飛程が非常に
短いため物質内部の 2 マイクロメートルのところで制動されてしまいます。この制動は電
子と原子核の振動(oscillation)を引き起こし、これによって当該物質の温度が上昇します。
つまり、熱の取り出しには単に核燃料要素の表面に適切な冷却材を掛ければ良いことにな
ります。もう一つの理由は、この蓄積された熱エネルギーの密度並びに温度が高くなること
で、これは、効率性の観点からみて有益なものと言えます。一方、核融合の場合には、発生
したエネルギーの大半を諸中性子が担うことになります。以前にも述べたとおり、これらの
中性子はより長い巨視的な距離を移動することによってその運動エネルギーを失いますの
で、このためにエネルギー密度と効率性が低くなります。

核分裂の際の諸中性子のエネルギーが核分裂生成物のエネルギーよりもずっと低いこと
のもう一つの優位性は、これらの中性子の保持するエネルギーが低ければ低いほど核分裂
を誘発し易くなることです。これらの中性子のエネルギーは熱中性子核分裂に必要なエネ
ルギーよりも随分高すぎますが、100MeV からよりも 1 MeV からのほうがずっと原則する
ことは容易です。

マイトナーはこの二つの核分裂生成物の陽子数の和が 92、つまりウランの原子番号と一
致しなければならないことを洞察して、下記のように提案しました。

「核分裂生成物のうちの一つがバリウムだとすれば、もう一つの方はクリプトン(原子番
号=92-56=36)であり、後者はルビジウム、ストロンチウム並びにイットリウムを経過し
て容易にジルコニウムに壊変する。このことから、提案されているバリウム — ランタン
— セリウムの壊変系列に加えてもう一つはストロンチウム — イットリウム — ジルコ

ニウムの壊変系列の可能性がある。」

マイトナーによれば、この反応は、次のようなものでした。



また、彼らの論文の中でマイトナーは 1937 年にベルリンの研究チームが発見していた半減期 23 分の放射能の発生についても次のように触れました[20]。

「… 半減期が 24 分で化学的にはウランと認定された物質はおそらく実際には ${}^{239}\text{U}$ であって … この物質は典型的な共鳴過程で生成したものと思われる。」

この主張は正しかったことが判明しました。数多いウラン生成物の中で ${}^{239}\text{U}$ というこの同位体は核分裂によって生成されたのではなく、中性子捕獲の共鳴過程によって生成されたものだったのです。

フリッシュは実験を通じてウランが二つに分裂するという主張を直接に確認したいと考えました。これには幾つかの方法があります。もっとも簡単な方法は荷電粒子をいわゆるウィルソンの霧箱(Wilson Chamber)を使用して検知するものでした。この霧箱に連結したオシロスコープが箱を通過する粒子を波形として捉えることができるはずです。1939 年 1 月 13 日フリッシュはコペンハーゲンにある霧箱から核分裂片からの強力なイオン化の波形を検知することに成功しました。彼はこうしてこの核分裂片のエネルギーが放射性壊変の際の α 粒子のエネルギーよりもずっと大きいことを確認することができました。分裂した一つの核からの二つの分裂片がそれまでに知られていたどの粒子をもはるかに



挿絵 11：西スウェーデンの原子力エネルギー研究プログラムを取り扱った映画のルポルタージュのなかに再現されているマイトナーとフリッシュの 1938 年クングスエルヴでの歴史に残るスキーでの散歩。

超えた膨大なエネルギーを持っているわけです。彼はこれらの反跳の観察の記述した速報を、核分裂の過程を説明した別の論文と同じ日(1939 年 1 月 16 日)にネイチャー誌に投稿しました。この速報は 1939 年 2 月 18 日に掲載されました[33]。核分裂過程を実験を通し

て確証したのはこれが最初でした。

マイトナーは 1939 年の 2 月半ばから 3 月の末までコペンハーゲンに滞在しました。彼女とフリッシュは共同で照射を受けたウランとトリウムからの核分裂生成物を調査するための実験を幾つか行いました。これらの実験結果の全容を記録したレポートが 2 か月後に出版されています[34, 35]。

核分裂の発見はこのような形で、マイトナーとフリッシュが 1938 年クリスマスのクングスエルフに滞在中にノルドレ川を辿った歴史的な散歩の出来事を通じて、スウェーデンの西部と強い繋がりを持っています。スウェーデン国営放送は 2002 年に西スウェーデンでの原子エネルギー研究プログラムを扱ったヤーソン・オロフ・ニルソン製作の番組の中でこれを取り上げました。このルポルタージュの中には歴史的な散歩の場面の再現が含まれており、ヤーソン・オロフと彼の奥さんがフリッシュとマイトナーの役を演じています[36]。この番組からの一場面の写真がこのページに載せられています³⁵。

³⁵ ヤーソン・オロフ・ニルソン監督の許可による

1.3.2 連鎖反応 (1938 年)

1939 年 1 月 7 日、ニールス・ボーアはプリンストン大学で講演するためにアメリカ合衆国へと出発しました。フリッシュは渡航前に核分裂に関する論文の草案を彼に渡しました。ボーアはドロットニングホルム号の船上で、マイトナーとフリッシュの核分裂に関する解釈並びにハーンとシュトラスマンがバリウムを核分裂生成物として検出したことをレオン・ローゼンフェルト³⁶と議論する機会を得ました。ボーアは僅か二日の間に核分裂に関するもっと完璧な説明を発展させました。ローゼンフェルトは次のように回想しています[2]。

「船上で会った時、彼[ボーア]はこう言いました。『僕はポケットの中にフリッシュがくれた非常に新しい発見についての論文を一つ持っているんですが、僕には実はまだよく理解できていないんです。これはぜひ一緒に見る価値がありますよ。』論文の議論が幾つもの実験に基づいているのでボーアは[核分裂という]結論自体は受諾しましたが、それでもなぜ原子核が分裂するのかは理解できなかったようでした。でもその後 6 日ほど経つ間に彼は解決案を思い付き、それがまた実に簡潔なものでした。」

この旅行の間に、その後に大きな影響を及ぼした重要な出来事が起こりました。ボーアはローゼンフェルトにこのニュースを機密扱いしてくれるようにと頼むのを忘れたのです。蒸気船ドロットニングホルム号は 1939 年 1 月 16 日にニューヨークに着きました。ローゼンフェルトはプリンストン大学を訪れると即時にこの核分裂のニュースを輪講会をも含めて皆に話し、このためにこのニュースが幅広く世間に広まってしまいました。

ボーアが合衆国に旅行したのは、ジョージ・ガモフ³⁷とエドワード・テラーが共同で、ジョージ・ワシントン大学とワシントンのカーネギー地磁気学研究所の支援を得て合衆国の首都ワシントンで開催した物理学シンポジウムに参加するためでした。シンポジウム開始

³⁶ レオン・ローゼンフェルト (Leon Rosenfeld, 1904～1974) はニールス・ボーアの助手並びに共同研究者の一人で、レプトンという概念を導入したベルギーの物理学者である

³⁷ ジョージ・ガモフ (George Gamow, 1904～1968) はロシア生まれのアメリカ合衆国の物理学者である。1928 年液滴モデルを最初に提唱した。(多量の水素とヘリウムによる) ビッグバン (Big Bang) 理論に多大な貢献をした 1948 年のアルファ・ベータ・ガモフ理論 ($\alpha \beta \gamma$ 理論) で最もよく知られている

の前の晩にガモフはテラーに電話してこう言いました[5]。

「ボーアは気が違ったみたいだよ。ウランの核が分裂するっていうんだ！」

翌朝の 1939 年 1 月 26 日、ボーアは予定されていた低温物理の講演の代わりに核分裂について講義しました。ボーアとフェルミはウランのことを「スプリッター(the splitter)」と呼びました。1 月 28 日の夜にワシントンのカーネギー研究所で核分裂の実験が行われて成功しました。この実験では一台のヴァン・デ・グラーフ加速器で 1 MeV に加速されたデュエテリウムのイオンでリチウムが照射され、中性子が放出されました。フェルミとボーアはオシロスコープの捕えた核分裂生成物からの膨大な波形を他の人々と共に観察したのでした。テラーは後に次のように述べています[5]。

「全く信じられないことだ。この実験自体はごく簡単に行える。それなのに何が起きているのか理解するのに何年もかかったのだからね！」

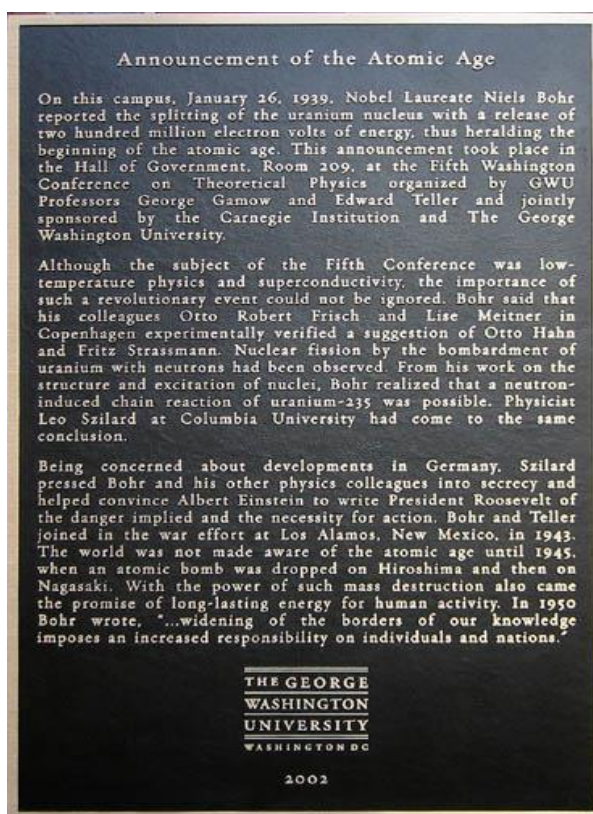
ジョージ・ワシントン大学の第 19 通りと G 通りの交差する曲がり角の建物に次のような銘文が刻まれています[4]。

「この部屋で 1939 年 1 月 26 日にニールス・ボーアが最初にウランのバリウムへの分裂、及びこれに伴って約 2 億万電子ボルトのエネルギーが各分裂毎に解放されることを公表した。」

2002 年には新しい青銅の銘板がジョージ・ワシントン大学構内の化学・物理学部の建物の入り口に掲げられました。この銘板には 1939 年 1 月 26 日の「原子力時代」到来の公表の出来事が記載されています。

ワシントンでの会合が終了しないうちに、核分裂の実験的証明がワシントンの

カーネギー研究所(1 月 28 日)、ジョン・ホプキンス大学(1 月 28 日)、カリフォルニア・バ



挿絵 12: ジョージ・ワシントン大学構内の化学・物理学部の建物の入り口にある 1939 年 1 月 26 日の核分裂の公表を述べた青銅の銘板。

ークレー大学やコロンビア大学(1月25日)等一連の大学から報告されました。核分裂の実験に関する最初の報告はフィジカル・レビュー(Physical Review)誌第55巻第4号にカーネギー研究所[37]、ジョン・ホプキンス大学[38]並びにカリフォルニア大学[39~41]の3つの研究グループからの「編集者への手紙」として掲載されました。これに続く報告は3月1日にカリフォルニア大学[42]とカーネギー研究所[43]からフィジカル・レビュー誌の次号(第55巻第5号)に発表されました。1939年1月25日にはコロンビア大学のヘルバート・L・アンダーソン³⁸が電離箱1台と彼がもともとサイクロトロンを使用した実験のために自分で作成した線形増幅器1台とを使用して合衆国で最初にウランの核分裂時の膨大なエネルギーの解放を実証しました[2]。コロンビア大学のフェルミの研究グループからの報告は他の3つの研究グループよりも2週間後の1939年3月1日にフィジカル・レビュー誌の第55巻第5号に掲載されました[44]。

一方、パリでは1939年1月16日にフレデリック・ジョリオ・キュリーがハーンとシュトラスマンからの核分裂生成物としてのバリウムに関する実験結果を受け取りました。1月26日彼は核分裂片についての結果をまとめて1月30日にコント・ランデュ誌に発表しました[45]。この時点では彼はマイトナーとフリッシュの論文のこともフリッシュの反跳の実験のことも知りませんでした。しかしながら、彼も合衆国の別の研究チーム達も以前には(誤って)超ウラン元素と考えられていた核分裂生成物が本当は何であるのかを突き止めようとはしませんでした。これらの“超ウラン元素”はもっとずっと軽い諸元素であることを最初に突き止めたのはバークレーのフィリップ・アーベルソンでした[40]。

やがてボーアは自分が合衆国で核分裂過程のことを暴露したことが一連の手早い実験とそれらに基づく論文の発表によってマイトナーとフリッシュが最初にこの発見を成したことを主張する可能性を大幅に縮小してしまったことに気がつきました。彼はこの事態を償おうとしましたが、それはおそらくもう手遅れでした。彼は短い論文を二つ、一つは合衆国に到着してから4日後の1月20日にネイチャー誌に[46]、そしてもう一つの方は2月7日

³⁸ ハーバート・L・アンダーソン(Herbert L. Anderson, 1914~1988)はアメリカ合衆国の物理学者で、E. フェルミ、L. シラードや W. ジンと共に世界最初の原子炉を構築した(このプロジェクトはCP-1と呼ばれている)。彼はコロンビア大学時代にエンリコ・フェルミとの草分け的な共同研究を通じ、なかでも核分裂の際の中性子の放出を証明したことにより1982年にエンリコ・フェルミ賞を受賞した。

にフィジカル・レビュー誌に送り[47]、これらは1939年2月25日と15日にそれぞれ掲載されました。これらの論文の中でボーアはマイトナーとフリッシュの成し遂げた「偉大な発見」並びにフリッシュの反跳実験の意義を強調しました。1939年の末までにこの分野で発表された論文の数は約100にも上りました[48]。

核分裂過程が連鎖反応に適していることも間もなく洞察されました。この2個の核分裂片内の過剰の中性子は放出されるべきで、それらの中性子が更に次々と核分裂を起こさせることができるはずだと気がつきました。1939年3月にウランの核分裂からの中性子の放出を最初に発見したのはカーネギー研究所のリチャード・ロバーツと彼の共同研究者たちでした。実を言えばこれはウランに中性子を照射してから約1分半後に放出される半減期が 12.5 ± 3 秒[43]のいわゆる遅発中性子なのです。これらの結果は間もなく他の学者たちによって確認されました[49, 50]。けれども遅発中性子の数は2個よりもずっと少なく、このためこれらの中性子によって連鎖反応を維持することはできません。ですが、連鎖反応は特定数が長いので原子炉の中で検証することが非常に重要です。連鎖反応が維持されるためにはもっともっと数多くの即発中性子が必要です。

即発中性子の存在はコロンビア大学のシラードとフェルミ及びパリのジョリオ・キュリーとによって同時に発見されました[51～53]。シラードは中性子源を製造するためにラジウムとベリリウムのサンプルを借りて使用し、中性子たちをパラフィンで減速しました[3]。1939年3月にシラードとウォルター・ジンはコロンビア大学のピューピン実験施設の7階で核分裂過程の中に「高速中性子の瞬間的な放出」を観察しました[52]。一方この実験施設の地下室ではフェルミの研究チームがシラードの製造した低速中性子源を使用することによって核分裂過程の瞬間に放出された高速中性子を観察していました[51]。どちらのチームも論文をそれぞれ3月16日にフィジカル・レビュー誌に送り、原稿は登録するだけにして著者たちが明示的に依頼するまで掲載はしないようにと依頼しました。その理由は、シラードとフェルミが吸収された中性子1個あたり少なくとも2個の中性子(が放出されるもの)と大まかな推測をしたためです。これは間違いなくホットニュースでした。何故ならこれは連鎖反応、そしてまた核兵器を製造することが理論的には可能だということを意味していたからです。彼らはこの事実が大っぴらに公表されることは避けたかったのです。この間にパリの研究チームもまた1939年3月8日にコロンビア大学のチームとは独立に核分裂から放出された「未知数の」中性子を観察することに成功しました。彼らはこの結果をネイチャー誌に3月18日に公表しました。3月16日には彼らは核分裂時の即発中性子の数は核分

裂一つ当たり平均 3.5 ± 0.7 であることを発見して論文の原稿を公表する目的で 3 月 21 日にネイチャー誌に送りました[54]。連鎖反応の可能性が(核兵器開発の)競争を引き起こすことを懸念したアメリカ合衆国の研究者たちは、ピエール・ジョリオ・キュリーに研究諸成果を秘密にするよう説得しようとしたが、ジョリオ・キュリーはこれを聞き入れずにこれらを公表することに決めたのでした[3]。このためシラードとフェルミもフィジカル・レビュー誌に彼らの論文を公表する許可を与え、それが 4 月 15 日に掲載されました。ジョリオ・キュリーの論文が掲載されたのは 4 月 22 日でした。フェルミとシラードは再度実験を行って遅発中性子を含めて ^{235}U の核分裂一回当たりの中性子の数を 2.3 個と確定しました[54, 55]。今日では熱中性子による ^{235}U の核分裂一回当たりの中性子の数は 2.4 個とされています。

ボーアはウランの核分裂は高速中性子と熱中性子の両方が引き起こせるのに対し、トリウムは高速中性子によってしか分裂させられないことに注目しました。彼は低速中性子(つまり熱中性子)の引き起こす核分裂はウランの同位体である ^{235}U に起因するものだということを見抜きました。ある論文の中で彼は次のように書いています[47]。

「ウランに及ぼす低速中性子の特別の効果は、ごく僅かな質量数 235 の同位体を中性子で照射したときに生成される質量数 236 の励起核の核分裂に関連していることが明らかにあり得ると考えられる。」

ボーアはジョン・A・ウィーラー³⁹と共に、ウラン—235 が天然ウランの中に存在している核分裂を起こし易い同位体であるとの仮定に基づいて核分裂の理論を定式化しました[56]。この理論は 1940 年に実験結果により支持を得ました[57, 58]。ヨーロッパとアメリカの物理学者たちは自己継続性の連鎖反応が爆弾として使用できるような大量のエネルギーの解放を引き起こすための前提条件を僅か 2 か月の間に把握したのでした。

³⁹ ジョン・アーチボルド・ウィーラー(John Archibald Wheeler, 1911~2008)はアメリカ合衆国の理論物理学者で原子爆弾の理論的開発に携わった。彼は統一場理論の先駆けの一人であり、また「ブラックホール」の概念の生みの親でもある。

1.4 核分裂のノーベル賞

1945 年 11 月 15 日、スウェーデンの王立科学アカデミーはオットー・ハーンのみに「彼の重核の核分裂の発見によって」1944 年のノーベル化学賞を授与することを決定しました。

この決定はそれ以来大きな議論や抗議を巻き起こし、これまでの全てのノーベル賞の中でも一番盛んに議論された決定とも言えます。議論の焦点は、なぜハーン一人だけにこの賞を授与したか、ということです。ハーンとは別に、あるいは彼との共同研究を通して意義のある貢献をした人々が他にも何人もいたからです。既に 1934 年にイーダ・ノダックがフェルミの実験に関係して核分裂の過程を提唱していました。イレース・キュリーはハーンとシュトラスマンのバリウム検出より何か月も前に照射を受けたウランの中にランタンを発見していました。つまりこの二人はハーンよりも先駆的でした。その上、ハーンはノダックとキュリー夫妻の成果が公表された時にその承認に反対した人々の一人で、彼らの研究が認められるのを「妨げた」とも言えます。また、ハーン自身の共同研究者についても疑問があります。決定的な諸実験はフリッツ・シュトラスマンが殆ど一人で行ったからです。ですがこの議論の焦点は何よりも、リーゼ・マイトナーの先駆的な貢献が、ハーンと一緒にのまたは別のノーベル賞の受賞に値しなかったのは何故かということ、及びハーンがこの分野でとった上記の態度に関してとも言えます。

歴史を振り返る時によくあるように、核分裂の発見に関しても何が本当の真実だったのかを後からはっきり知ることはできません。「こうだった、ああだった」という様々な議論が存在しています。ある意味ではこの議論はリーゼ・マイトナーに焦点が当たりすぎて来たとも言えます。問題の複雑さと事実に基づいた客観的な視野が必要だと最近のイングマル・ベリストレムの投書[62]で指摘されました。投書の著者は当時、この分野での研究に従事していて鍵となる人々多数と個人的な接触を持っていたことから、彼の投書はまた客観的な評価のために高い価値があるのです。私共この本の著者たち自らのコメントも含めながら事実の一部を下記にまとめてみましょう。

ハーンとシュトラスマンのバリウムの核分裂生成物としての発見の報告(ナチュールヴィッセンシャフテン誌、1939 年 1 月 6 日)並びにマイトナーとフリッシュの核分裂過程の解

積(ネイチャー誌、1939 編 2 月 11 日)は双方ともに世間をあっと言わせるような先駆的なものでした。彼らは、照射されたウランの残滓の大半が核分裂片であることを明らかにすることによって、それまでそこに誤って超ウラン元素を探していた数々の試みに終止符を打ちました。核分裂の過程はまた、無限に近いエネルギー源や非常に強力な破壊兵器を手に入れる目的で連鎖反応を引き起こす努力への途も開いたのです。

ここに一つの疑問が湧きます。マイトナー(そしておそらくはシュトラスマンも)にはなぜハーンと共にノーベル賞が授与されなかったのでしょうか？これに関連したもう一つの疑問は、スウェーデンの王立科学アカデミーのノーベル賞受賞者選考委員会はこの二つの業績(バリウムの検出と核分裂過程の説明)のうちの片方だけに授与することを決めたのでしょうか、ということです。この最初の成果は化学賞、もう一方は物理学賞とすることができたかもしれないのです。

ノーベル賞に関する公文書類の研究によれば、ハーンとマイトナーは、別々にも(ハーンは 1915 年と 1924 年化学賞の受賞候補者、マイトナーは 1937 年物理学賞の受賞候補者でした)一緒にも(ハーンとマイトナーとは 1924 年、1934 年と 1939 年に化学賞の共同受賞候補者でした)何度もノーベル賞受賞の候補者に推薦されています[18]。1939 年 1 月、核分裂のニュース到来の直後にテ・スヴェードベリ⁴⁰はハーン単独並びにハーンとマイトナーの二人を共同の化学賞に推薦しました。1939 年 3 月にスヴェードベリはハーンとマイトナーのノーベル化学賞授与推薦に際し、彼らの放射能に関する研究と 1939 年の核分裂の発見についての詳細な概要を送りました[17]。ですが後の 1941 年と 1942 年に彼は自分の 1939 年に下した判断を再評価し、マイトナーが核分裂の発見に果たした役割を縮小しました。もう何年も前にフォッシュニング・オック・フラムステグ(Forskning och Framsteg)誌に掲載されたある記事によるとスヴェードベリは、もしマイトナーとシュトラスマンの核分裂過程の説明がボーアの液滴模型に基づいていたとすればボーアが発見の名誉を得るべきだと主張しました。ですが、これはボーア自身も賛成しなかったであろうと思われる何とも変わった意見と言わざるを得ません。スヴェードベリはさらに、バリウムの検出に繋がったハーンの最後の研究は(マイトナーとの)共同研究活動が終了した後に行われたものであり、ハー

⁴⁰ テオドル・スヴェードベリ(Theodor (“The”) Svedberg, 1884~1971)はスウェーデンの化学者で「分散系に関する業績」により 1926 年にノーベル化学賞を受賞した。1939 年には彼はノーベル化学賞委員会の会長であった。

ンのこの発見が「原子核の研究に間違いなく重要な意義を持っている」と主張しました[59, 60]。

何人もの優れた研究者たちが、マイトナーにもハーンと共にノーベル賞が授与されるべきだったと述べています[17]。アーサー・コンプトン⁴¹は、核分裂の発見はハーンの化学研究の成果とマイトナーの物理研究の成果の両方に由来するものであるとして1940年にハーンとマイトナーの兩人にノーベル物理学賞を授与するようにと提案しました。彼は次のように述べています[59]。

「私の理解するところによれば、ハーンとマイトナー両教授には核分裂過程の認定と核分裂の際に膨大なエネルギー解放されることの実証とをもって双方一緒にノーベル賞が授与されるべきである。」

ジェームズ・フランク⁴²は彼が1941年ハーンとマイトナーとがノーベル物理学賞を共に授与されるべきだと提案した推薦状の中で次のように述べています[59]。

「この発見が過去10年の最大のものであることは私が強調するまでもありません。ですから、私はなぜハーンとマイトナーが二人一緒に賞与されるべきであるかをご説明したいと思います。」

この前置きの後フランクは彼らの30年間にわたる緊密な共同研究について説明しました。マイトナーがベルリンを離れることを余儀なくされたことについて彼はこう述べています。

「この論文はハーンとマイトナーが共同執筆で書いたものではなく、ハーンが独自にシュトラスマンと共同で発表しました。論文には確かに結論が記述されていました。ですが、この結論に最初に到達したのはハーン自身ではありません。研究結果の意味を完全に理解して核分裂生成物が相互に膨大なエネルギーを持って飛散するという結論はリーゼ・マイ

⁴¹ アーサー・ホリー・コンプトン(Arthur Holly Compton, 1892~1962)はアメリカ合衆国の物理学者で1927年に「彼の名をとって命名された効果(コンプトン効果)の発見の功績により」ノーベル物理学賞を受賞した。

⁴² ジェームズ・フランク(James Franck, 1892~1962)はドイツの物理学者で、1925年にグスタフ・ルドヴィッヒ・ヘルツ(Gustav Ludvig Hertz, 1887~1975)と共に「原子と電子の衝突を操る法則の発見」の功績によってノーベル物理学賞を受賞した。

トナーがフリッシュの協力下で引き出したものです。そのうえ、この事実を最初に実験を通して観察したのも彼女とフリッシュでした。』

この発言はこの共同研究におけるマイトナーの役割をも含めた状況をおそらく一番良くまとめたものと言えるでしょう。その上、ベルリンの研究チームでウランの中性子照射研究を開始並びに推進したのもリーゼ・マイトナーでした。彼女はまた 1938 年 12 月にハーンが自分の論文の公表を計画していた時の重要な相談相手でもありました。彼がバリウムの発見に関して受けたこの支持をイーダ・ノダックは彼からは受けておらず、またイレヌ・キュリーもこの支持を彼やリーゼ・マイトナーからは受けませんでした。おそらくこのせいで核分裂の発見がランタンではなくバリウムの検出だけに関連付けられてしまったものと思われます。リーゼ・マイトナーの成した貢献は明らかに多大で幾つもの研究分野にまたがるものです。

ハーンとマイトナーが共同でノーベル化学賞を受賞すべきだとの提案は 1941 年にもノーベル化学賞受賞者選考委員会に提出されました。フランクはハーンとマイトナーとが共同でノーベル物理学賞を授与されるべきだと 1943 年に再提案しました。1945 年と 1946 年にはオスカル・クライン⁴³とボーアがハーンとマイトナーに共同のノーベル化学賞を授与するとともにマイトナーとフリッシュには物理学賞を授与すべきだと提案しました。ボーアは 1947 年と 1948 年にもマイトナーとフリッシュに化学賞の授与を提案し、またハーンも 1947 年にマイトナーへの授与を提案しました。

何人ものノーベル賞受賞者を含む多数の著名な研究者たちがこのように推薦を繰り返したにも拘わらず、ノーベル賞受賞者選考委員会が化学、物理部門とも核分裂の発見と解釈に関するマイトナーの功績と貢献を無視したことは注目に値すると言わざるを得ません。選考委員会は両部門とも核分裂の発見は化学分野での功績と見做し、このためこの発見は化学部門の選考委員会だけで取り扱われました。ハーンの候補資格は委員会秘書のアーネ・ヴェストグレーンが毎年推薦状を繰り返して送ったことにより維持されました。1944 年春の

⁴³ オスカル・クライン (Oskar Klein, 1894~1977) はスウェーデンの理論物理学者で父親はハンガリーからの移民である。彼は中でもクライン-ゴルドン方程式、クライン-仁科の公式並びにカルツァークライン理論等を通して知られている。1959 年にドイツの物理学会から理論物理学への並外れた功績によりマックス・プランク賞を受賞した。

会議で化学部門の選考委員会はハーン一人に 1944 年の賞を授与することを提案しました。当時の政治的な状況からみて不適切と考えられたため、授与は翌年に延期されましたが、この時点ではハーンは他の何人かの研究者たちと共に英国のファームホール⁴⁴に強制収容されていて賞を受け取ることができませんでした。彼が 1944 年の賞を受け取るためにストックホルムに赴いたのはさらに一年後の 1946 年 12 月でした。

マイトナーがドイツから避難していなければ彼女はこの論文の共同執筆者であって、それが状況を劇的に変化させたことだろうとの議論がしばしばなされます。これはイングマール・ベリストレムが指摘するとおり本当であって、ここにこの歴史の最大の悲劇と不公平さが存在しているとも言えましょう[62]。この出来事をハーンやノーベル賞選考委員会のせいにはすることはできません。リーゼ・マイトナーをバリウム検出の論文の共同執筆者として含めることは当時の状況下では明らかな理由で不可能だったのです。

それでも、マイトナーがベルリンに所在していなくてもそれ以前にはそのことが共同の論文発表の妨げにはなっていなかったことを考えずにはいられません。1918 年に彼らがそれまで知られていなかった 91 番元素の同位体の検知に携わっていた時に起こっています。当時ハーンは軍隊に勤務していて殆どいつも留守がちだったため、リーゼ・マイトナーが実験作業や化学分析等の全てを遂行していました。この研究は彼らがプロトアクチニウムと名付けた新元素の検知に繋がりました。これは大きな業績でかつ重要な結果でした。この時にはハーンの不在は研究結果を共同の論文の形で発表する障害にはならず、そればかりかハーンの名前が最初に載せられています。

この話の中で一番不思議なのはハーン自身のとった態度です。彼は核分裂の発見の直後からこの発見に関するマイトナーの貢献を認めることを避け始め、彼が一人で行った化学活動だけを書き始めました。彼はまた数々の賞を単独で喜んで受賞しています。この傾向はノーベル賞に限らず、例えば 1956 年のカイゼル・ウィルヘルム化学研究所のオットー・ハーン・バウへの改名の際にも見られます。核分裂発見当時の政治的な状況に照らして彼がその時点でこうせざるを得ないと考えたこと理由は幾つもあり、文献を通して説明されています[63]。ですが、彼が一生この立場を変えず、そのことがリーゼ・マイトナーの功績

⁴⁴ファームホール(Farm Hall)は英国南部に所在し、第二次世界大戦後連合軍が戦後 1945 年の後半に会話盗聴の目的で核物理学分野の優れたドイツの科学者たちを抑留した場所である。詳細は https://en.wikipedia.org/wiki/Operation_Epsilon 等を参照のこと。

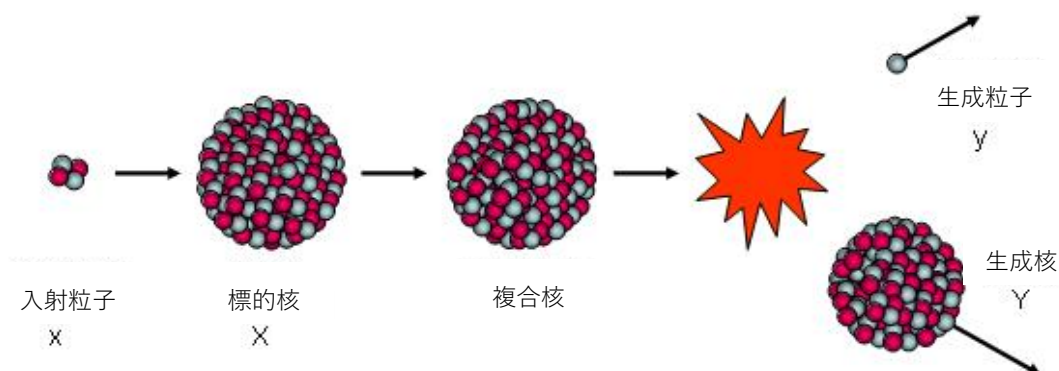
がそれに値する認識を得られなかったことに強く影響を与えたことに関しては、彼に共感を持つのは難しく思われます。その結果として、この二人の関係はその後 10 年間はかなり冷たいものとなったのです。

時が経つにつれて、リーゼ・マイトナーが不公平な扱いを受けたという意見が強くなり、このことに関する幾つもの記事や議論が発表されました。当初はドイツ国外だったものの、彼女の功績が次第に認められるようになって、幾つもの権威ある国際的な賞が彼女に授与されました。1966 年にはエンリコ・フェルミ賞がオットー・ハーン、リーゼ・マイトナーとシュトラスマンとに授与されました。ハーンとマイトナーに関しては「天然放射能の先駆的な研究並びに広範詳細な実験研究によって核分裂の発見への途を開いた」ことが理由に挙げられた一方で、シュトラスマンへの授与の理由は「核化学への貢献と広範詳細な実験活動によって核分裂の発見という最高峰に到達した」とされています。

エンリコ・フェルミ賞はアメリカ合衆国では最古でかつ最も威信に満ちた科学技術分野の賞の一つであり、その中でも最高の「名誉賞(Prestige Award)」と言えるもので、アメリカ政府から授与されます。この賞は 1938 年のノーベル物理学賞受賞を記念して 1956 年に設立されました。

ドイツでも、リーゼ・マイトナーの貢献を広範に認める必要があるとの声がこの間に高まって来ました。1956 年にオットー・ハーン・パウと改名された旧カイゼル・ウィルヘルム科学研究所は後にもう一度改名されました。2010 年 10 月 27 日、同研究所のリーゼ・マイトナー講堂で行われた公の儀式で、研究所名は「自由大学所属ハーン・マイトナー・パウ」となりました。大学の学長はこの改名のことを「リーゼ・マイトナーの核研究における貢献を数十年間にわたって過小評価してきた歴史的な不公平を修正するもの」と述べました[63]。

参考資料 1：諸種の核反応



図表 3：核反応の図解

上記の図表 3 が示すとおり、核反応は二つの核子あるいは二つの粒子が衝突して元々とは異なる 2 次的な核子あるいは粒子を生成する過程のことです。(もし粒子同士が衝突後変化せずに、つまり元と同じ原子番号と質量番号のままでお互いから離れるのであれば、その過程は反応ではなく、弾性的または非弾性的な散乱と呼ばれます)。核反応では標的核が天然の放射性物質からの α 粒子、核反応からの中性子、または水素から電子が剥がされて生成された陽子の照射を受けます。陽子や α 粒子は標的核に突入できるよう電界で加速してより高いエネルギーを与えることができます。

特定の核反応は化学反応式とよく似た式で表すことができます。もし一つの標的核 X が一つの粒子 x に衝突されて、別の核 Y と放出された別の粒子 y になるとすれば、これは下記のように書くことができます[2]。

$$x + X \rightarrow y + Y \quad (11)$$

この式は次のように短縮して書くこともできます。

$$X(x, y)Y \quad (12)$$

<標的核> <入射粒子、放出粒子> <生成核>

核反応時の質量欠損

核反応を起こすには、エネルギーは過程内で生成するか外部から供給しなければなりません。反応で生成されるエネルギー Q は諸粒子の質量の反応前後の差によって定義されます。

$$Q = [(m_x + M_x) - (m_y + M_y)]c^2 = \Delta mc^2 \quad (13)$$

上式では $(m_x + M_x)$ と $(m_y + M_y)$ とが反応前と後の各静止質量の合計に相当します。アインシュタインの方程式 $E=mc^2$ によれば質量とエネルギーとは同等です。諸反応生成物の質量の合計がもともと存在していた諸粒子(突入してくる入射粒子と衝突された核)の質量の合計よりも少なければ、質量欠損は正值($\Delta m > 0$)で、生成エネルギー Q も正值となります($Q > 0$)。ここで欠損した質量はエネルギーに変換されています。この反応はエネルギーを放出するので発熱性の反応と呼ばれます。もし諸反応生成物の質量の合計がもともとの諸粒子の質量の合計よりも多ければ、この生成エネルギー Q は負値となります($Q < 0$)。このような反応はエネルギーを「消費」し、反応が起こるためにはエネルギーを外から供給しなければならないので「吸熱性」と呼ばれます(ここではこのエネルギー量と供給することが必要な付加質量とは同量です)。

質量は普通原子量単位で表され、原子量 1 単位(1 原子質量単位, u)は炭素同位体 C-12 (^{12}C) の質量の十二分の一と定義されています。言い換えれば、C-12 の質量は 12.000 u と全く同じ、ということです。

$$m_u = 1u = 1.6605387313 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad (14)$$

この場合のエネルギーの単位は電子ボルト(eV)と呼ばれます。これは一つの電子が電位差 1 ボルトの電界を通過した時に取得する運動エネルギーと等しいものです。原子質量単位 1 単位(あるいはドールトン(Dalton))を同等のエネルギーで示すと下記のようになります。

$$E_{1u} = 1 \text{ u}c^2 = 931.494 \text{ MeV} \quad (15)$$

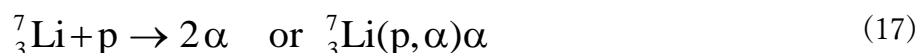
核反応の表現

核反応は化学反応とよく似た表現を使用して説明することができ、後者とよく似た均衡の法則に従っています。反応に与る粒子はそれぞれの化学記号で書かれ、下書きの数字は原

子番号(原子核の正電荷数)、上書きの数字は原子質量を示しています。こうすることで、陽子は ${}^1_1\text{H}$ (水素原子の核)あるいは「 p 」、また陽子一つと中性子一つから成り立つデューテリウム(重水素)は ${}^2_1\text{H}$ または短く「 d 」と書くことができます。アルファ粒子は「 α 」あるいは(ヘリウム核のように) ${}^4_2\text{He}$ と書けます。中性子、電子、中性微子並びにベータ粒子とガンマ光子はそれぞれ n , e , ν , β 及び γ と書きます。化学反応と同様、左辺と右辺の大きさは同じでなくてはなりません。このことから、リチウム核に陽子を衝突させて二つの α 粒子が生成される核反応については下記のように記述できます。



上式は別の記号を用いて次のように表現することもできます。



反応前と後の質量はそれぞれ下記のとおりです。

反応前の質量の合計

$$M_X = m({}^7\text{Li}) = 7.0161 \text{ u}$$

$$\underline{m_x = m({}^1\text{H}) = 1.0078 \text{ u}}$$

$$m_x + M_X = 8.0239 \text{ u}$$

反応後の質量の合計

$$M_Y = m({}^4\text{He}) = 4.0026 \text{ u}$$

$$\underline{m_y = m({}^4\text{He}) = 4.0026 \text{ u}}$$

$$m_y + M_Y = 8.0052 \text{ u}$$

質量欠損は $\Delta m = 8.0239 \text{ u} - 8.0052 \text{ u} = + 0.0187 \text{ u}$ となります。

つまり質量欠損は正值で、発熱性の反応であることがわかります。解放されたエネルギーは $0.0187 \times 931.494 \text{ MeV}$ です。式(17)に示された反応は実のところ原子核の人工的な変換の最初の観察に対応するものでした。この先駆的な貢献は 1932 年 4 月 14 日にウォルトンとコッククロフト⁴⁵が成したものです。標的核リチウムに最高で 70 万電子ボルト(700 keV)まで加速された陽子を衝突させ、その照射の結果として標的核から α 粒子が放出されることを観察しました。これらの α 粒子のエネルギーは実験を通して約 8.5 MeV であるこ

⁴⁵ ジョン・ダグラス・コッククロフト卿(Sir John Douglas Cockcroft, 1897~1967)は英国の物理学者、トーマス・シントン・ウォルトン(Thomas Sinton Walton, 1903~ 1995) はアイルランドの物理学者。二人は 1951 年に「人工的に加速された粒子による原子核の変換に関する彼らの先駆的な業績をたたえるもの」として共同でノーベル物理学賞を受賞した。

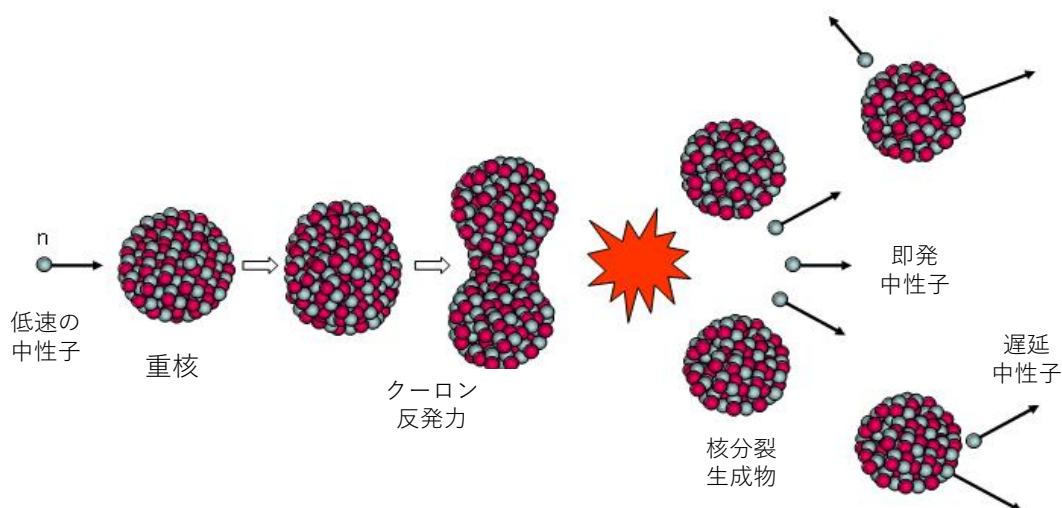
とが測定されました。この実験結果は、質量とエネルギーが同等だというアインシュタインの仮説の最初の証明となりました。

原子核の結合エネルギー

核反応が起きたということは核の結合エネルギーが変化することを意味します。原子核内の核子一つ当たりの結合エネルギーの平均は約数 MeV です。核反応によってなぜこんなに多大なエネルギーが解放されるのかはここに原因があるのです。

核の質量は核を構成する陽子と中性子の合計の質量よりも常に少ないのです。この欠損分の質量(つまり質量欠損 Δm)は核子間の牽引力(強力な核力あるいは強力な相互作用)と同じ量です。核の結合エネルギーは $E = \Delta mc^2$ 、つまり核子を繋ぎ止めているエネルギーで与えられます。言い換えれば、このエネルギーは核を個々の陽子と中性子とに壊変させるのに必要なエネルギーと同じです。核の安定性は、これらの強力な牽引的な核力と正荷電を持つ陽子のもたらす反撥的な電気力との均衡の問題なのです。

参考資料 2：核分裂と連鎖反応



図表 4：重核一つに低速中性子一つがもたらす核分裂の概説図。この核は熱中性子を吸収して複合核を生成する。これは非常に不安定で強く振動し、形が崩れて来る。このような「形の崩れた」滴の中では、電気力が優位を占めるようになって核が元よりも小さい二つの滴(核分裂片)に分裂する。この二つの破片は相互の電気的反発力によって互いに飛散する。核分裂片は多数の中性子を含んでおり、これらの過剰な中性子が即時に放出される。遅発中性子は一部の核分裂生成物から後に放射される。

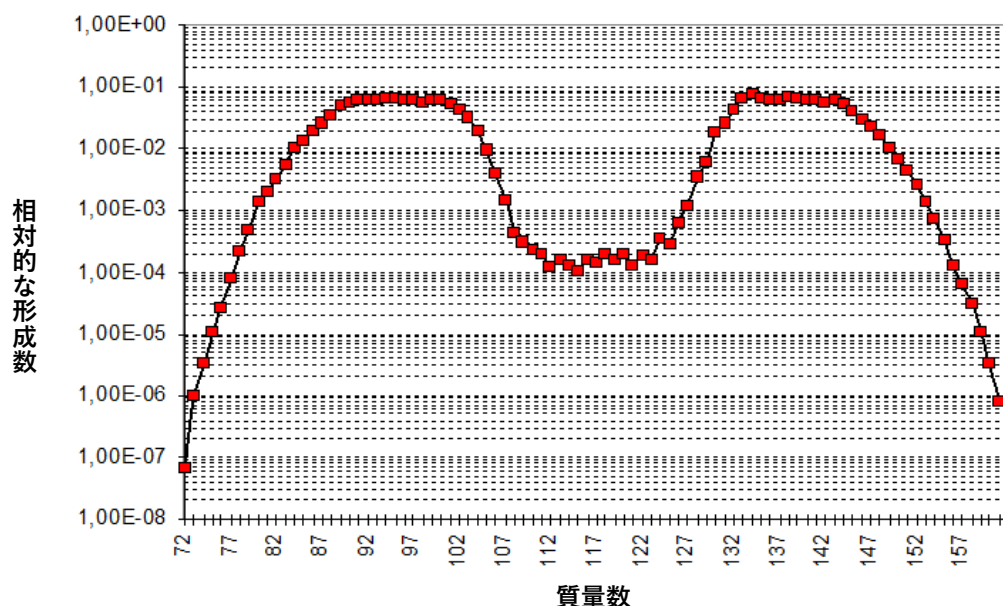
核分裂は中性子を捕獲した重核のどれからでも引き起こされますが、一方で連鎖反応の方は低速中性子が起こす核分裂(熱中性子核分裂)からの方が引き起こしやすいのです。低速の中性子の方がなぜ核反応を引き起こしやすいのかについては本書の第1章第1節第4項(1.1.4)に簡単に説明されています。同時に低速中性子は、核子が奇数の中性子を持つウランかプルトニウムの同位体、例えば ^{233}U 、 ^{235}U 、 ^{239}Pu 等からしか核分裂を引き起こせません。熱中性子核分裂は核が奇数の中性子を含む幾種かの人工の超ウラン元素でも起こることがあります。

中性子(あるいは他の軽い粒子)一つを吸収した後、この重い核は不安定な複合核となって形が崩れます。このように表面が非球状の形を成して形が崩れた核の中では、強力な核力とは違って力の到達距離のずっと長い排斥的な静電気力が強まって来ます。これらの静電反発力が核を繋ぎ止めている強い牽引力よりも大きくなると核分裂が起こるのです。すると複合核は、核分裂片あるいは核分裂生成物と呼ばれる二つの以前より小さい部分に分裂し

ます(時には三つに分裂することもあります)。核分裂片の生成に引き続いて即座に(10^{-13} 秒以内に)二つか三つのいわゆる即発中性子が 1~3MeV のエネルギーと秒速約 1~2 万キロメートルの速度で放出されます。核分裂生成物の質量の合計は分裂前の核の質量よりも少ないため、核分裂一回当たり約 200MeV もの多量のエネルギーが解放されます。即発中性子の他にも核分裂生成物の放射性壊変の際には幾つかの中性子が放出されます。これらの中性子は「遅発中性子」と呼ばれ、数秒から 1 分ほどの間に、即発中性子よりも低いエネルギーでの放出が起こります。重核一つの核分裂の概要図が図表 4 に示されています。

ウラン—235 の核分裂

U-235 は熱中性子による核分裂が可能な唯一の天然元素です。低速で 1 eV の僅か何分の一のエネルギーしか持たない熱中性子一つを捕獲した後生成される複合核の U-236 は非常に不安定で中くらいの大きさの二つの部分に分裂します。ウラン核の質量の半分に近い質量数 118 ぐらいの核分裂生成物のごく僅かです。この複合核は質量の違う二つの部分に分裂する可能性の方がずっと高く、最もしばしば生成される破片の質量数は第 8 図が示すように 95 と 137 のあたりです。吸収された熱中性子一つあたり ^{235}U の熱中性子核分裂を通して平均 2.42 個の中性子を放出します。大半(>99 パーセント)は即発中性子です。遅

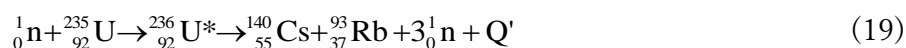
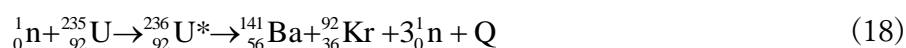


図表 5：熱中性子の引き起こした U-235 の核分裂からの核分裂生成物の質量分布。
質量平均の 118 の付近で生成される核分裂生成物はかなり数が少なく、分布は極小を示している。最も可能性の高い核分裂片の質量は質量数 95 と 137(この図で示される二つの極大値)の付近となっている。

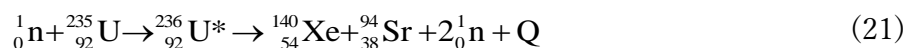
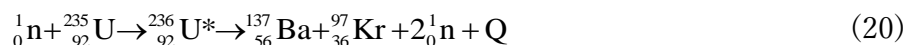
発中性子の平均の比率は約 0.7 パーセントです。遅発中性子の中でも最も寿命の長いものの半減期は約 56 秒です。核分裂中性子の全てに対しての比率は小さいにもかかわらず、遅発中性子は原子炉の制御と運転に非常に重要な役割を持っているのです。

この連鎖反応は核分裂の際に放出される中性子が原子炉の炉心の中の ^{235}U から更に核分裂を引き起こしてこれが次々に繰り返されていくという原理に基づいています。これが現実機能するためには、原子炉の炉心の構造並びにウランの量を考慮して「必要最小限の質量」の達成とその維持ができなければなりません。今日使われているいわゆる熱中性子炉には質量数及び中性子の吸収断面積がともに小さい「減速材」と呼ばれる物質を使用して、もともとは高速の核分裂中性子が吸収されずに熱エネルギーまで減速されるようにしています。これは、熱中性子の方が高速中性子よりも ^{235}U の核分裂をより効率的に引き起こすためです。最小限の必要量は、燃料の中の濃縮された ^{235}U 核の含有量と原子炉の炉心の構造及びどのような減速材を使用するかによって異なります。もし燃料が 20 パーセント以上に濃縮された ^{235}U を含有していれば減速材の必要はありません。濃縮度が 100 パーセントの場合の最小限の必要量は約 15 キログラムです。

ウランの核は幾つもの違う形で分裂させることができます。(リーゼ・マイトナーが提案した)バリウムとクリプトンへの核分裂あるいはセシウムとルビジウムへの核分裂は下記のような式で表現することができます。



双方の場合とも即発中性子が 3 個放出されて、その上にエネルギーが放出されます。即発中性子が 2 個放出される他のウラン核分裂の例を下記に示します。



第 1 表に示す通り、解放されるエネルギー Q は定数ではなく、核分裂ごと(つまりウラン一核ごと)に平均で約 207 MeV です。

この解放されたエネルギー Q のうち中性微子による 12MeV が全く相互作用を起こさず

に原子炉の炉心から消えてしまいます。ですがその一方で、連鎖反応の中での避け難い（しかし核分裂には繋がらない）「寄生的な」中性子の捕獲は γ 線の放射を引き起こします。原子炉の構造等にもよりますが、この γ 線のエネルギーは一つの核分裂当たり 3～12MeV のエネルギーに達します。このエネルギーは原子炉の中で吸収されてしまいますから、核分裂一つ当たりの原子炉で利用可能なエネルギーの総計の平均は結局 198～207 MeV ということになります。

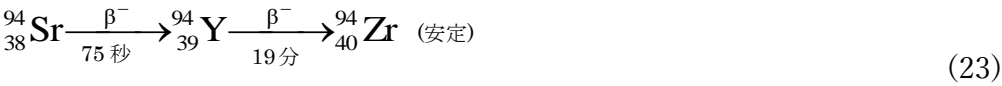
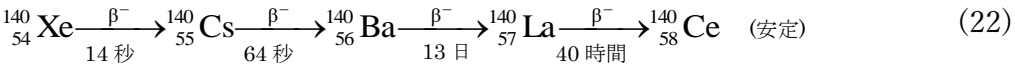
放出エネルギーの種類	放出エネルギーの量 (MeV)
核分裂片の運動エネルギー	168
即発 γ 線	7
核分裂中性子	5
核分裂生成物の壊変からのエネルギー	
γ 線	7
β 線	8
(検出不可能の)中性微子	12
放出エネルギーの総計	207 MeV

図表 6：ウラン核分裂の際に放出されるエネルギー

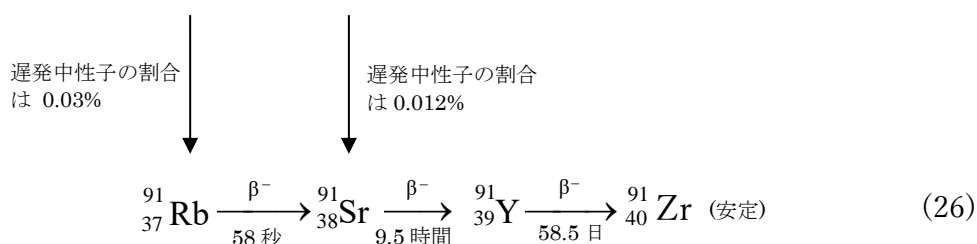
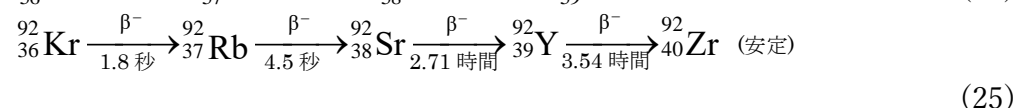
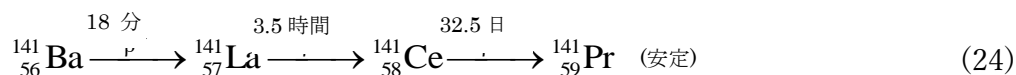
核分裂片の壊変

核分裂生成物は放射能が非常に強く、幾つもの β 壊変(β -sönderfall)を経過した後にやっと安定した最終生成物に到達することができます。半減期の異なる β 壊変を 1934 年に最初に観察したのはエンリコ・フェルミと彼の共同研究者たちでした。

上記の過程(21)の核分裂生成物としてのキセノンとストロンチウムの壊変は次のように書くことができます。

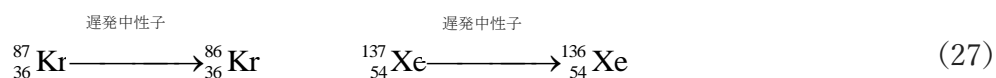


上記の過程(18)の核分裂生成物であるバリウムとクリプトンがプラセオディウムとジルコニウムに変換する β 壊変の例は下記のように示すことができます。



幾つかの核分裂生成物では、励起エネルギーが生成物の核中の子中性子の結合エネルギーよりも大きい励起状態にあります。この場合には中性子の遅発放出が β 壊変の後に起こることがあります。この遅発は、 β 壊変の壊変時間が有限であるという事実によるものです。(26)で ${}^{92}\text{Rb}$ が遅発中性子を放出して ${}^{91}\text{Rb}$ に変化するのはこの例です。

この他に知られている遅発中性子放出は下記の通りで、 ${}^{235}\text{U}$ の熱中性子核分裂の際の遅発中性子の割合は 0.021%及び 0.140%です。



2. 核分裂の発見に重要な役割を果たした 科学者たちの伝記

2.1 アーネスト・ラザフォード (Ernest Rutherford, 1871 年～1937 年)

1908 年に「元素の壊変並びに放射性物質の化学に関する研究」によりノーベル化学賞を受賞。

アーネスト・ラザフォードは 1871 年 8 月 30 日にニュージーランドのネルソン県スプリング・グローブ(今日のブライトウォーター)に生まれた。1937 年 10 月 19 日にケンブリッジで死去。彼の遺灰は英国ロンドンのウェストミンスター寺院に安置されている。



挿絵 13 :
アーネスト・ラザフォード卿

学歴：

1890～1894：クライストチャーチのカンタベリー・カレッジ(今日のカンタベリー大学)で B.A.(教養学士号、1892 年)、数学と数理物理学並びに自然科学両方の第一級優等学位での M.A.(修士号、1893 年)並びに地質学と化学専攻の B.S.(理学士号、1894 年)を取得。

1895：「英国審議会から 1851 年（ロンドン万博記念）研究奨学金(1851 Research Fellowship from the Royal Commission for the Exhibition of 1851)」と呼ばれる奨学金を得てニュージーランドから英国に移る。

1901：ニュージーランド大学から理学博士号を取得。

職歴：

1895～1898：ケンブリッジ大学のキャヴェンディッシュ研究所に勤務。1896 年から J.J. トムソン教授⁴⁶と共に研究活動。

1898～1907：カナダのモントリオール市のマックギル大学の教授に就任。1900 年にはカナダ王立学会、1903 年には英国王立協会の会員に選出された。

1907～1919：英国マンチェスター市ヴィクトリア大学の物理学教授。

1919～1937：ケンブリッジ大学キャヴェンディッシュ研究所所長。

1925～1937：ロンドン王立学会会長(1925～1930)、英国科学産業研究省諮問委員会委員長(1929～1937)、(英国)物理学会会長(1931～1933)、(英国)学術助成評議会(AAC)会長(1933～1937)。

貢献：

1898：天然放射能に由来する二種類の放射線を発見し、 α -及び β 放射線と名付けた。ラザフォードは後に α 粒子がヘリウムの核であり、ベータ粒子はより低いエネルギーのレベルに移行するため不安定な同位体から放出された高エネルギーの電子から成り立っていることを証明した。

1898：放射能は原子核の自発壊変であることを証明し、これによって 1908 年にノーベル化学賞を受賞した。

1899：新たな種類の放射性の気体を発見し、これを最初トリウム—232 の自然壊変生成物トロンと名付けたが、これは後にラドンの同位体の一つ ^{220}Rn であることが判明した。

1902～1903：フレドリック・ソディー⁴⁷と共に放射能の性質を研究し、放射性原子の「壊変理論」を案出した。これは放射過程を分子ではなく原子レベルのものとして説明した

⁴⁶ ジョゼフ・ジョン・トムソン卿(Sir Joseph John Thomson, 1856～1940)は英国の物理学者で、1906 年に「電気の気体内の通過に関する研究」(1897 年の電子の発見のことを指す)によりノーベル物理学賞を受賞した。

⁴⁷ フレドリック・ソディー(Frederick Soddy, 1877～1956) は英国の化学者で 1921 年に「放射性物質の化学の理解への貢献並びに諸同位体の起源と性質との研究」によりノーベル化学賞を受賞した。

最初の理論である。

1908：ハンス・ガイガー⁴⁸と共にいわゆるラザフォード・ガイガーカウンター(放射性原子から放出された個々の粒子の探知方法として使用される)を開発した。

1911：ラザフォード後方散乱(Rutherford scattering)と呼ばれる薄い金箔からの α 粒子の後方散乱の結果に基づいて原子核のモデルを詳述。このモデルは一つの原子内の大半の質量が 10^{-15} メートルの大きさの核に集中して存在していることを推論し、これが彼の二番目に大きな科学への貢献となった。

1916：英国海軍本部の発明研究委員会(Board of Invention and Research)から W.H.ブラッグ⁴⁹と共に潜水艦の音源定位装置の特許を取得。

1919：窒素の核を α 粒子で照射して酸素原子と陽子とを生成することによって原子を分裂させることに成功し、世界初の「錬金術師」となった。これが彼の三番目の大きな貢献である。

1920：「陽子」という学術用語を提案し、中性子の存在を予言した。

1934：粒子束を大幅に改良した低電圧加速機をマーク・オリファント⁵⁰と共に開発。彼はこの機器を利用してデュテリウム同士を衝突させることにより、トリチウム(^3H 、水素の第三同位体)並びにより軽いヘリウムの同位体(^3He)を発見した。

褒章等：

⁴⁸ ヨハネス・(ハンス)・ウィルヘルム・ガイガー(Johannes (Hans) Wilhelm Geiger, 1882～1945)はドイツの物理学者で、ガイガーカウンター(あるいはそれを改良した 1928 年のガイガー・ミュラー計数管)の発明者として、また原子核の発見をもたらした(薄い金箔からの粒子の後方散乱を扱った)ガイガー・マースデンの実験によって最も知られている。

⁴⁹ ウィリアム・ヘンリー・ブラッグ卿(Sir William Henry Bragg, 1862～1942)は英国の物理学者で、「レントゲン放射線を使用しての結晶構造の分析への貢献」により、1915年に息子のウィリアム・ローレンス・ブラッグ卿(Sir William Lawrence Bragg, 1890～1971)と共にノーベル物理学賞を受賞した。

⁵⁰ マルクス・ローレンス・エルヴィン・オリファント卿(Sir Marcus Laurence Elwin Oliphant, 1901～2000)はオーストラリアの物理学者で、水素爆弾の基礎をなす重水素同位体による核融合反応の最初の発見者である。オーストラリア科学アカデミーを 1954 年に創立し、1954 年から 1956 年の間初代の院長を務めた。

ランフォード・メダル(1904)並びにノーベル化学賞(1908)。爵位の授与によりアーネスト・ラザフォード卿となり(1914)、メリット勲章受賞(1925)の後初代ネルソンとケンブリッジのラザフォード男爵となった(1931)。

ラザフォードはキャヴェンディッシュ研究所の非常に優れた研究者のチームを組織した。キャヴェンディッシュ研究所の研究者たちは彼の指導の下でさらに三回ノーベル物理学賞を受賞した。

- ジェームズ・チャドウィック (James Chadwick, 1891～1974) が「中性子を発見」(1932 年)したことにより 1935 年にノーベル物理学賞を受賞。
- ジョン・ダグラス・コッククロフト (John Douglas Cockcroft, 1897～1967) と トーマス・シントン・ウォルトン (Thomas Sinton Walton, 1903～1995) とが「人工的に加速された原子諸粒子による核変換(transmutation) に関する彼らの先駆的な業績」によって 1951 年にノーベル物理学賞を共同受賞(最初の公開実験は 1932 年に行われた)。
- エドワード・ヴィクトル・アップルトン (Edward Victor Appleton, 1892～1965) は高層大気内における物理の研究並びにいわゆるアップルトン層の発見によって 1947 年にノーベル物理学賞を受賞(発見は 1924 年)。

1997 年には第 104 番目の元素がラザフォードの業績を讃えてラザフォードイウム $^{261}_{104}\text{Rn}$ と命名された。

ラザフォードはペンシルバニア、マックギル、バーミンガム、エジンバラ、メルボルン、ケンブリッジ、ロンドン等多数の大学から名誉博士号を受けた。また多くの国々の多数の建物が業績を讃えて彼の名前を取って命名されている。彼はまたスウェーデン(1968)、カナダ(1971)、ロシア(1971)とニュージーランド(1971、2000)の 4 か国で切手のモチーフともなった。彼の肖像はニュージーランドの一番高額の紙幣(100 ニュージーランド・ドル)にもみることができる

2.2 レオ・シラード (Leó Szilárd, 1898 年～1964 年)

連鎖反応のアイデアの生みの親、また他の研究者たちと
共同で原子炉を開発した。



挿絵 14：レオ・シラード

レオ・シラードは 1898 年 2 月 11 日にハンガリーのブダ
ペストに生まれ、1964 年 5 月 30 日にカリフォルニアの
ラ・ホヤで死去した。

学歴：

1916～1919：ブダペスト工科大学でシビルエンジニアを専攻。

1920：ベルリン－シャルロテンブルグの工科大学でシビルエンジニアになる勉強を継続、
その後ベルリン大学物理学部に入学。

1922：「現象論熱力学の揺動現象への拡張に関して (*On the extension of phenomenological
thermodynamics to fluctuation phenomena*)」の研究によりベルリン大学から博士号を取得
した。

1925：「知的生物の干渉が引き起こす熱力学システム内のエントロピーの減少に関して (*On
the Decrease of Entropy in a Thermodynamic System by the Intervention of Intelligent
Beings*)」の研究において熱力学の法則を情報理論に適用し、これに依って教授資格認定
(*Habilitationsschrift*)を修了(この研究は 1929 年に出版された)。この業績は現代の人工知能
学理論の重要な先駆けとなった。

職歴：

1923：ヘルマン・マーク (Herman Mark) と共同でベルリン－ダーレムにあるカイゼル・ウ
ィルヘルム化学研究所で X 線回折に関する実験を行った。

1924～1926：ベルリン大学理論物理学研究所でマックス・フォン・ラウエ⁵¹(Max von Laue、シラードの博士論文の個人指導教授)の助手となる。

1926～1933：アルバート・アインシュタインと7年間にわたって可動部無しの冷蔵庫の共同開発に従事した。この二人はアインシュタイン-シラード・ポンプと呼ばれる環状の誘導ポンプの技術革新にも一緒に携わった。1927年にシラードはベルリン大学所属の物理学の私教師(Privatdozent)に指名され、1928年にはアインシュタイン-シラード冷蔵庫を開発する目的でA.E.G.(Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft)にコンサルタントとして雇用された。また彼はこれと併行して1930年から理論物理学、核物理学並びに化学の講義にも携わった。

1933～1937：ナチの迫害を逃れてドイツから英国に移り、原子核連鎖反応のアイデアを確立すべく1934年ロンドンの聖バーソロミュー病院で、また1935年にはオックスフォードのクラレンドン研究所で、連鎖反応に適切な元素を探す実験を行った。彼はまたシラード・チャルマーズ反応と呼ばれる人工の放射性諸同位体の濃縮方法をも発見した(1934年)。

1938～1941：コロンビア大学に勤務のためニューヨーク・シティーに移る。

1942～1945：シカゴに移ってシカゴ大学の冶金学研究所(Chicago Met. Lab., 今日ではアルゴンヌ国立研究所と呼ばれている)に勤務。純粋な黒鉛とウランの調達に携わり、原子炉の冷却装置の設計を続けた。マンハッタン・プロジェクトにも関わった。

1946～1956：研究分野を物理学から分子生物学に変更。1946年にシカゴ大学の放射線生物学及び生物物理学研究所所属の生物物理学教授に任命された。アーロン・ノヴィック(Aaron Novick)と共にシカゴ大学の独自の研究所で分子生物学の研究を開始し(1948～1953)、「流浪の理論生物学者」とも呼ばれて、1956年にシカゴ大学のエンリコ・フェルミ核科学研究所の生物物理学の教授に指名された。

1957～：核エネルギーの平和的な利用並びに国際的武器制約を活発に促進して東西の著名な科学者たちを招いて平和と世界の安全保障について議論を行う科学と世界の諸問題に関するパグウォッシュ会議シリーズ(*Pugwash Conferences on Science and World Affairs*, 1957

⁵¹ マックス・フォン・ラウエ(Max von Laue, 1879～1960) はドイツの物理学者で、「レントゲン放射線が結晶を通過する際の回折の発見」により1914年にノーベル物理学賞を受賞した。

年以降)に頻繁に参加した。1962年には「戦争廃絶のための協議会(Council for Abolishing War,後に住みやすい世界のための協議会(Council for a Livable world)と改名された)」を創立した。

1963～1964：カリフォルニア州ラ・ホヤのソーク研究所に勤務。

貢献：

1926～1930：アインシュタインと共に特にアインシュタイン-シラード電磁ポンプ使用の冷蔵庫に関する特許を英国、アメリカ合衆国(US 特許番号 1781541、1930 年)とハンガリーから取得。

1928：線形加速装置の特許申請をドイツに登録。

1929：サイクロトロンの特許申請をドイツに登録、また情報1単位のエントロピーが $k \ln 2$ に等しいことを証明した彼のマックスウェルの悪魔(Maxwell's Demon)に関する権威ある分析をツァイトシュリフト・フュール・フィジーク(Zeitschrift für Physik)に発表した。

1931：電子顕微鏡に関する特許申請をドイツに登録。A.E.G. の研究所でアインシュタイン-シラード電磁ポンプ使用の冷蔵庫の試運転に成功。

1934：中性子連鎖反応に関する特許申請を英国に登録、これは後に機密扱いを保証するため英国海軍本部に移された(英国特許第 630,726 号)。

1937：ベータトロンを設計。

1939：ウォルター・ジン(Walter Zinn)と共同で、核分裂過程では中性子も放出されることを実証(1939 年 3 月)、ナチ・ドイツが核分裂を利用して武器を開発する可能性を警告するためアインシュタインが米国のフランクリン・D・ルーズベルト大統領に送った手紙(署名は 1939 年 8 月 2 日)の原稿を執筆。このアインシュタインとシラード連名の手紙の結果、アメリカ合衆国政府は核分裂の研究開発を開始した。

1940：エンリコ・フェルミ並びにハーバート・アンダーソン(Herbert Anderson)と共にウラン-黒鉛体系内での小規模な実験を通して中性子の増倍を発見することにより、連鎖反応が可能であることを実証した。

1942：フェルミ等と共に世界最初の原子炉の建設を支援し、シカゴの冶金研究所(Chicago

Metallurgical Laboratory)で世界に先駆けて人工制御下の連鎖反応も実行した(1942年12月2日)。

1944：専門用語「増殖型原子炉」を提唱。

1948：(ノヴィックと共に) 制御条件下で細菌培養を継続的に生産する装置を発明。

1955：合衆国の特許許可局からエンリコ・フェルミと共に提出した特許申請が承認された(US特許番号第2708656号、1944年12月19日に申請、1955年5月17日に承認)。

1959：老化についての理論を発表。

褒章等：

シラードはアメリカ合衆国の文芸科学アカデミーの会員に選ばれ(1954年)、またアメリカ人道主義協会(American Humanist Association)から「今年の人道主義者」にも指名された(1960年)。ルイス・アンド・ローザ・シュトラウス記念基金(Lewis and Rosa Strauss Memorial Fund) からアルバート・アインシュタイン賞 (Albert Einstein Award)を受賞(1960年)、また平和のための原子力賞(Atoms for Peace Award、1960年)も受賞した。国立科学アカデミーの会員に選ばれ(1961年)、ブランデーズ大学から名誉博士号(H.L.D) も授与されている(1961年)。

国際天文学連合(I.A.U.)は月の裏側(北緯 34°; 東経 106°)にあるクレーターを「シラード」と命名した(1970年)。

2.3 エンリコ・フェルミ (Enrico Fermi, 1901 年～1954 年)

「中性子照射による新しい放射性元素の存在の証明、並びにこれに関連した低速中性子の引き起こす核反応の発見」の功績により 1938 年にノーベル賞を受賞した。

理論物理学と実験物理学の双方にわたる重要な貢献をしたフェルミは 1900 年代の最大の科学者の一人と見做されている。



エンリコ・フェルミは 1901 年 9 月 29 日にイタリアのローマに生まれ、1954 年 11 月 28 日にシカゴで死去した。

挿絵 15：エンリコ・フェルミ

学歴：

1918～1922：ピサ大学(Scuola Normale Superiore)で勉強。1922 年に物理学博士の称号を取得。

職歴：

1923～1924: イタリア政府から奨学金を得てドイツのゲッティンゲン大学(Universität Göttingen)に留学し、マックス・ボーン⁵²(Max Born)と共に二か月を過ごした。またロックフェラー財団からのフェローシップを獲得してオランダのライデン大学(De Universiteit Leiden)のポール・エーレンフェスト(Paul Ehrenfest)⁵³のもとにも数か月間留学した(1924 年)。

⁵² マックス・ボーン(Max Born, 1882～1970)はドイツの数学者並びに物理学者で、「量子力学分野における波動関数の統計的解釈を始めとする基礎研究成果」により、1954 年にノーベル物理学賞を受賞した。

⁵³ ポール・エーレンフェスト(Paul Ehrenfest, 1880～1933)はオーストリア生まれのオランダの物理学者並びに数学者である。量子力学におけるエーレンフェストの定理と相対性理論におけるエーレンフェスト・パラドックスとによって最も知られている。

1924～1926：フローレンス大学で数理物理学と力学の講師となる。

1927～1938：ローマ大学に数理物理学教授として所属。

1939～1942：ノーベル賞を受賞した直後にアメリカ合衆国に移り、ニューヨークのコロンビア大学から物理学教授に指名される。

1942～1954：シカゴ大学の冶金学研究所の教授、また世界で初めて人工制御下の連鎖反応を用いた世界初の原子炉の建設を積極的に推進した。フェルミはまた原子力エネルギーと原子爆弾の開発を目的とするマンハッタン・プロジェクト内の一つの物理学者チームの指導者の一人であった(1942年～1945年)。彼はシカゴ大学の核科学研究所の教授の地位を受諾して、 π 中間子と核子との間の相互作用を研究した。同時に彼はまた宇宙線の起源の謎にも関心を持っていた(1946年～1954年)。

貢献：

1926：パウリの排他原理に従う諸粒子(今日では『フェルミ粒子』(例えば電子、陽子、中性子と中性微子)と呼ばれる)の分布を支配する「フェルミ統計」と呼ばれる統計的な法則を発見した。

1927～1928：統計的な原子模型(トーマス・フェルミ原子模型)の研究に携わり、原子特性の半定量的な算出方法を編み出した。

1934：中性微子の存在に関してウォルフガング・パウリ⁵⁴が最初に提唱した仮説に基づく β 放射性壊変、つまりベータ粒子の放出、についての理論を提唱。

1934～1938：ローマの研究チームと共同で、中性子が照射されると大半の自然元素は核変換を起こすことを実証した。また、この過程の中で低速中性子がもたらす効果も発見した(1934年)。フェルミはこの業績をもって1938年にノーベル物理学賞を受賞した。

この分野における一連の論文はイタリアのリセルカ・シエンティフィカ誌(Ricerca

⁵⁴ ウォルフガング・パウリ(Wolfgang Pauli, 1900～1958)はオーストリアの物理学者で「パウリの原理」とも呼ばれている排他律(Exclusion Principle)の発見の功績により、1945年にノーベル物理学賞を受賞した。

Scientifica, R. S.) にまず発表された^{55, 56}。

フェルミの業績は1938年末のハーンとシュトラスマンの核分裂の発見に至る最終の跳躍台となった。

1939～1940：H.アンダーソン、L.シラードとの共同研究を通じて、核分裂過程が自由中性子の放出を引き起こすことを実証した(1939年3月)。ウラン-黒鉛体系での小規模な実験を通して中性子のかなりの増倍を発見することにより、連鎖反応が可能であることを実証した(1940年)。

1942：世界最初の中性子炉(neutronic reactor)の建設を指導し、シラード等と共にシカゴの冶金学研究所で世界に先駆けて人工制御下の連鎖反応を達成した(1942年12月2日)。

「neutronic reactor」という用語はフェルミ自身が自分の特許の題目等の中に使用したものである。

1942～1945：ロス・アラモスで世界最初の原子爆弾の設計製造に参加。

1952：シカゴ大学のシンクロサイクロトロン建設に参加。これは当時世界中で一番強力なものであった。

フェルミはアメリカ合衆国では多数の特許を単独あるいは共同で所有していた。その中でも重要なものは下記の通りである。

- 合衆国特許第 2206634 号(1940年7月2日): “Process for the Production of Radioactive Substances(放射性物質の製造過程)”。E. Amaldi, F. Rasetti, E. Segrè, B. Pontecorvo との共同取得
- 合衆国特許第 2524379 号(1950年10月3日): “Neutron Velocity Selector(中性子速度選択器)”
- 合衆国特許第 2708656 号(1955年5月17日): “Neutronic Reactor (中性子炉)”。L. Szilárd と共同取得。申請は 1944 年 12 月になされた。
- 合衆国特許第 2714577 号(1955年8月2日): “Neutronic Reactor (中性子炉)”。W.H.

⁵⁵ E. Amaldi, O. D'Agostino, E. Fermi, F. Rasetti, E. Segrè, “Radioattività provocata da bombardamento di neutroni”, *RS* 5(1) (1934) 652~53, *RS* 5(2) (1934) 21~22 並びに 467-70, *RS* 6(1) (1935) 123~25, 435~37 及び 581~84.

⁵⁶ E. Fermi, E. Amaldi, O. D'Agostino, F. Rasetti, E. Segrè, “Artificial Radioactivity Produced by Neutron Bombardment”, *Proc. Roy. Soc. (London)* A146 (1934): 483~500.

Zinn と共同取得。

- 合衆国特許第 2768134 号(1956 年 10 月 23 日)：“Testing Material in a Neutronic Reactor (中性子炉内での物質のテスト)”。他の数人と共同取得
- 合衆国特許第 2780595 号(1957 年 2 月 5 日)：“Test Exponential Pile(指数関数炉のテスト)”
- 合衆国特許第 2798847 号(1957 年 7 月 9 日に登録)：“Method of Operating a Neutronic Reactor(中性子炉の運転方法)” 他の数人と共同取得
- 合衆国特許第 2807581 号(1957 年 9 月 24 日)：“Neutronic Reactor(中性子炉)”。L. Szilárd と共同取得。
- 合衆国特許第 2807727 号(1957 年 9 月 24 日)：“Neutronic Reactor Shield (中性子炉の遮蔽)”。 W.H. Zinn と共同取得。
- 合衆国特許第 2813070 号(1957 年 11 月 12 日)：“Method of Sustaining a Neutronic Chain Reacting System(中性子連鎖反応システムの維持方法)”。 M.C. Leverett と共同取得。
- 合衆国特許第 2836554 号(1958 年 5 月 27 日)：“Air Cooled Neutronic Reactor(空冷式中性子炉)”。 L. Szilárd と共同取得。
- 合衆国特許第 2837477 号(1958 年 6 月 3 日)：“Chain Reacting System(連鎖反応システム)”。 M.C. Leverett と共同取得。
- 合衆国特許第 2852461 号(1958 年 9 月 16 日)：“Neutronic Reactor(中性子炉)”。W.H. Zinn 並びに H.L. Anderson と共同取得。
- 合衆国特許第 2931762 号(1960 年 4 月 5 日)：“Neutronic Reactor(中性子炉)”。
- 合衆国特許第 2969307 号(1961 年 1 月 24 日)：“Method of Testing Thermal Neutron Fissionable Material for Purity(熱中性子核分裂の可能な物質の純度テストの方法)”。 H.L. Anderson と共同取得。

褒章等：

フェルミはノーベル物理学賞(1938 年)やアイゼンハワー大統領と米国原子力委員会からの特別賞(1954 年)を受賞し、後者の賞は 1956 年からエンリコ・フェルミ賞(Enrico Fermi Presidential Award) として設定された。

フェルミの名前は多数の概念にも登場する。例えば、スピンの半整数の(half-integer spin)諸粒子はフェルミオン(*fermions*) と呼ばれる。核物理学ではフェルミ(*fermi*)は 1 フェムトメートル(*femtometre*, $\text{fm}=10^{-15}\text{m}$)である。原子番号 100 の人工放射性元素は

1952 年にフェルミウム(Fermium) $_{100}\text{Fm}^{252-257}$ と命名されている。

多くの科学研究所や賞も彼の名前を冠して業績を称えている。シカゴの国立加速器研究所(The National Accelerator Laboratory)は 1974 年にフェルミ国立加速器研究所(Fermi National Accelerator Laboratory, FNAL)と改名された。シカゴ大学の核科学研究所(The Institute for Nuclear Studies)は 1955 年にエンリコ・フェルミ核科学研究所(The Enrico Fermi Institute for Nuclear Studies)と改名され、その後 1968 年からはエンリコ・フェルミ研究所(The Enrico Fermi Institute)と呼ばれている。

2.4 イーダ・タッケ・ノダック (Ida Tacke-Noddack, 1896 年～1978 年)

元素レニウムを共同発見。また核分裂に関する最初の仮説を発案した。



挿絵 16：イーダ・タッケ・ノダック

イーダ・タッケ・ノダックは 1896 年 2 月 25 日にドイツのヴェーゼル近郊のラックハウゼンに生まれた。1926 年にワルター・ノダックと結婚。1978 年 9 月 24 日に西ドイツのボンに程近いノイエンアールで死去した。

学歴：

1915～1921：ドイツの女性研究者の先駆けの一人でベルリン - シャルロッテンベルグ工科大学(Technische Universität, Berlin-Charlottenberg)で化学を専攻し、1919 年に工学修士の資格を取得。1921 年に化学工学博士となった。

職歴：

1921～1923：ドイツ産業界の最初の女性研究者としてベルリンの AEG に勤務。

1924～1925：ベルリンのジーメンス・ウント・ハルシュケ(Siemens & Halske)に勤務。

1925～1935：ベルリンの国立物理工学研究所(Physikalisch-Technische Reichsanstalt)に勤務。当時化学実験室の室長であったワルター・ノダック博士と共に周期表にまだ登録されていない元素の探求に従事した。1926 年にノダック博士と結婚。

1935～1941：ドイツのフライバーグ大学物理化学研究所で夫と共に研究活動に従事。

1942～1944：フランスのシュトラスブール大学に勤務。

1944～1956：トルコに在住して研究に従事。

1956～1968：ドイツのバンベルク大学地質化学研究所に勤務。

貢献：

1925～1926：W. ノダック及び O. ベルグと共に第 75 番目の元素を発見してレニウムと名付けた。この新元素はノルウェー産のプラチナ含有鉱石とコロンブ石の中から発見された。彼らはまたガドリウム石と輝水鉛鉱の中にもこの新元素を発見した。彼らは 660 キログラムの輝水鉛鉱から 1 グラムのレニウムを抽出することに成功した(1926 年)。

出典：ナチュールヴィッセンシャフテン(*Naturwissenschaften*) 誌第 13 号にベルグ、ノダックとタッケが発表した“*Die Ekamangane(エカ・マンガーネ)*”という論文の 567 - 574 頁。

ベルグ、ノダックとタッケはこの論文の中で、自然岩から第 43 番目の元素の存在も証明したとしてこれをマスリウム(masurium, Ma)と名付けた。この発見は議論を引き起こした。それまでに知られていた第 43 番目の元素の同位体はどれも不安定で、半減期が地球の年齢よりもずっと短かったからである。この第 43 番目の元素は後にカルロ・ペリエ(Carlo Perrier)とエミリオ・セグレ(Emilio Segrè)により、バークレーにあるサイクロトロンの中で放射線照射を受けたモリブデンの中に発見され、1937 年にテクネチウム(Tc)と名付けられた。

1934：エンリコ・フェルミの中性子照射実験はウランよりもずっと軽い諸元素を生成したようであり、中性子がウラン核を幾つかの重い部分(すでに知られていた幾つかの元素の同位体)へと分裂させた(今日では核分裂(fission)として知られている過程)のだろうと提案した⁵⁷。彼女のこの提案が正しかったことは 1939 年に確認された。

褒章等：

イーダ・タッケ - ノダックは 1919 年にベルリンの工科大学化学冶金部からザ・ファースト・プライズ(the First Prize)を授与された。彼女は 1925 年にドイツ化学者協会(the Society of German Scientists)の総会で女性として初の講演を行った。1931 年にはレニウム発見の功績によりドイツ化学協会(German Chemical Society)からユストス・リービヒメダル(Justus Liebig Medal)、また 1934 年にはスウェーデン化学者学会

⁵⁷ ツァイトシュリフト・フュール・アンゲヴァンデ・ Chemie(*Zeitschrift für Angewandte Chemie*)誌第 47 号に I. ノダックが 1934 年に発表した論文“Über das Element 93 (第 3 番目の元素に関して)”の 653 頁。

(Svenska kemistssamfundet)からシーレメダル(Sheelee Medal)を受賞した。1966年にはハンブルグ大学から名誉博士号を授与され、同年にドイツ連邦共和国のハイ・サービス・クロス勲章も受賞した。1934年にはスペイン物理化学学会(Spanish Society of Physics and Chemistry)、また1963年には国際栄養研究学会(International Society of Nutrition Research)の名誉会員となった。

イーダ・タッケ-ノダックは1933年、1935年と1937年にノーベル化学賞の受賞候補者に推薦されたが、結局授与されなかった。

2.5 イレーヌ・ジョリオ・キュリー (Irène Joliot-Curie, 1897 年～1956 年)

1935 年に「彼らの新たな放射性元素の合成の功績を認める」
として、夫のジャン・フレデリック・ジョリオット・キュリー
(Jean Frédéric Joliot-Curie, 1900～1958)と共にノーベル
化学賞を受賞した。

イレーヌ・キュリー(マリーとピエール・キュリー夫妻の娘)
は 1897 年 9 月 12 日パリに生まれた。1926 年にフレデリッ
ク・ジョリオットと結婚。1956 年 3 月 17 日にパリで死去。



挿絵 17 :
イレーヌ・ジョリオ・キュリー

学歴：

1914：コレージュ・セヴィーニエ(Collège Sévigné)で物理学
士号(*Baccalauréat*)を取得。

1925：ソルボンヌ大学から博士号(Ph.D.)を取得。論文のテーマは「ポロニウムからの α 放
射線についての研究(Investigation of α -rays from Polonium)」であった。

職歴：

1915～1918：第一次世界大戦中母親のマリー・キュリーと共に兵士たちの負傷診断のため
放射線診断装置を載せた車で軍隊兵舎を巡回訪問した。

1918～1956：両親が設立したラジウム研究所で、マリー・キュリーの助手を、1946 年から
1956 年の間は所長を務めた。1924 年から 1939 年にかけては、単独または夫と共に
天然及び人工の放射能、核変換並びに核物理学の研究に従事した。

1936：レオン・ブルムの人民戦線内閣下で 4 か月間、閣内全三人の女性の一人として科学研
究担当国務次官を務めた。

1932～1946：ソルボンヌ大学に 1932 年から講師として勤務し、1937 年に理学部の教授に
就任した。

1946～1951：パリ大学理学部の名誉教授並びにフランス原子力委員会(CEA)の化学部門の

責任者。

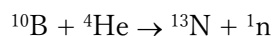
貢献：

1931～1934：ジョリオークュリー夫妻は当時のほかのどれよりも少なくとも 10 倍の強さのポロニウム源を保持していた。1931 年に夫妻は α 粒子を照射されたベリリウムは非常に貫通力が高い放射線を放出することを報告した(このことは 1930 年にドイツのヴァルター・ボーテ(Walther Bothe)とヘルベルト・ベッカー(Herbert Becker)がもつとずっと弱いポロニウム源を使用して発見していた)。夫妻は、(当時はまだそれが中性子であることが知られていなかった)ベリリウムの第二次放射線をパラフィンのスクリーン(水素源)に照射すると、この第二次放射線がパラフィンのスクリーンから陽子を放出させることを発見した。残念なことに彼らは自分たちの発見の意義が理解できず、この貫通放射線は γ 線から成り立っているものと考えた。この間違いが本書の第 1 章 1 節 2 項に述べられているように、1932 年にジェームズ・チャドウィックに中性子を発見する機会を与えることになった。ジョリオークュリー夫妻は、 α 粒子照射後の軽い元素からの放射線に関する系統的な研究により、霧箱で撮影した高エネルギーの γ 放射線の飛跡の写真を通して不思議な「陽性の電子」の兆候も観察していた。彼らは正しい結論を下さなかったために陽電子を発見する機会を逃し、この発見は 1932 年の夏に C. D. アンダーソン(C. D. Anderson)の宇宙線シャワーの観察により成し遂げられることになった。

1934 年 1 月：ジョリオークュリー夫妻は既に知られていた元素の人工的な放射性同位体を幾つも発見した。これらの同位体は間もなく生物医学や癌の治療に重要な役割を果たすこととなった。幾つもの軽い元素を強力なポロニウム源から放射された α 粒子で照射することにより、彼らはホウ素、マグネシウムとアルミニウムから自然には存在しない窒素、ケイ素とリンの同位体を生成することに成功した。夫妻は 1935 年に「彼らの新たな人工放射性元素の合成の功績を認める」ものとしてノーベル化学賞を受賞した。

窒素の放射性の同位体の生成例は下記の通りである⁵⁸。

⁵⁸ I. Joliot-Curie, F. Joliot-Curie “Production artificielle d'éléments radioactifs. Preuve chimique de la transmutation des éléments”, *Comptes Rendus* 198 (1934) 254, 559; “Artificial production of a new kind of radio-element”, *Nature* 133 (1934) 201.



質量数 10 のホウ素を α 粒子(質量数 4 のヘリウム核)で照射するとこれが中性子の一つ放出するとともに質量数 13 の窒素に変換される。

アルミニウムを使用した場合の同様の過程は下記のようになる⁴⁸。



アルミニウムに α 粒子を照射すると中性子一つ放出されてリンが生成される。リンの原子はその後陽電子壊変を通じてケイ素の人工同位体を生成する。

1937～1938：P. サヴィッチ(P. Savitch)と共同で半減期が 3.5 時間のランタンの放射性同位体を発見したが、これが究極的に何かを探知することはしなかった^{59,60}。この同位体はウランの中性子照射に由来する核分裂生成物である。

褒章等：

イレーヌ・ジョリオークュリーは 1935 年にノーベル化学賞を、また 1940 年にはバーナード科学勲功章 (Barnard Medal for Meritorious Service to Science)を、双方ともフレデリック・ジョリオークュリーと共に受賞した。彼女はまたフランスのオフィシエ・レジオンドヌール勲章(Officier de la Légion d'honneur)の受賞者でもある。

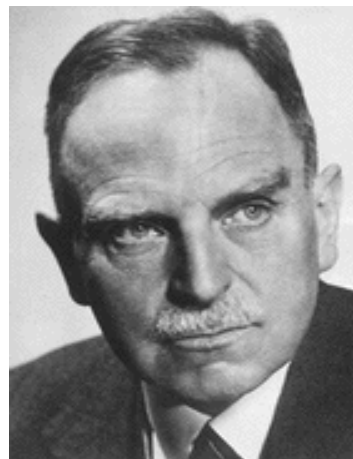
イレーヌ・ジョリオークュリーはフランス外に於いても幾つものアカデミーや多数の学会に所属し、また複数の大学から名誉博士号を授与された。

⁵⁹ I. Curie, P. Savitch, “Sur les radioéléments de période 3.5 heures formés dans l’uranium irradié par les neutrons”, *Comptes Rendus* 206 (1938) 906-908; 1643-1644.

⁶⁰ I. Curie, P. Savitch, “Sur les Radioéléments Formés dans L’ Uranium Irradié par les Neutrons II”, *J. Phys. Rad.* 9(1938) 355-359.

2.6 オットー・ハーン (Otto Hahn, 1879 年～1968 年)

1944 年に「重核の核分裂の発見の功労」によりノーベル化学賞を受賞。1966 年にはリーゼ・マイトナー及びフリッツ・シュトラスマンと共にエンリコ・フェルミ賞を受賞した。



挿絵 18 : オットー・ハーン

オットー・ハーンは 1879 年 3 月 8 日にドイツのフランクフルト・アム・マインに生まれ、1968 年 7 月 28 日にドイツのゲッティンゲンで死去した。

学歴：

1897～1901：マールブルグ大学とミュンヘン大学で化学を専攻。

1901：マールブルグ大学から博士号を取得。博士論文の題は「*Über Bromderivate des Isoeugenoles*」であった。

1907：ベルリン大学哲学部から放射性トリウムの研究に基づく教授資格認定を修了。

職歴：

1902～1904：マールブルグ化学研究所に助手として勤務。

1904～1905：ロンドン大学でウィリアム・ラムゼイ卿⁶¹の下で研究に携わる。

1905～1906：カナダのモントリオール市にあるマックギル大学物理学研究所でラザフォード教授の下で研究に携わる。

1907～1945：大学講師の資格を取得してベルリン大学化学研究所に勤務。

⁶¹ ウィリアム・ラムゼイ卿 (Sir William Ramsay, 1852～1916) はスコットランドの科学者で 1904 年に「大気中の不活性気体元素の発見並びにこれらの元素の周期表上の位置の決定」の功績を認められてノーベル化学賞を受賞した。

1912～1945：カイゼル・ヴィルヘルム化学研究所(Kaiser-Wilhelm-Institut(KWI) für Chemie)に勤務。1912年にKWIの科学者会員となり、同年に放射化学部門長となる。

1914～1918：第一次世界大戦中、化学戦争専門家として欧州のあらゆる前線で活動した。
1921年には教授になるとともにプロシア科学アカデミー(Preussische Akademie für Wissenschaften)の会員ともなり、1928年から1945年の間はKWIの会長を務めた。
1933年にはイサカのコーネル大学の客員教授でもあった。

1907～1938：ハーンとリーゼ・マイトナーは30年以上に亘って共同研究を行った。これらの研究は、放射性物質からの β 放射線並びにそれらの吸収能や磁気スペクトル等に関する研究から(ハーンが共同研究の開始直前に発見した)放射性反跳を利用して新たな放射性壊変生成物の取得までに及んだ。1934年以降、ジョリオ・キュリー夫妻の人工放射能の発見並びにフェルミの核反応過程への中性子利用の後、ハーンはウランとトリウムへの中性子照射過程に関する共同研究をマイトナーと、また後にはシュトラスマンと一緒にを行った。ハーンは1944年まで、核分裂生成物である幾つもの元素を分離・同定する研究に携わった。ハーン、マイトナーとシュトラスマンは第二次世界大戦中の核兵器に関する研究には関わらなかった。

1946～1960：1946年にカイゼル・ヴィルヘルム協会(Kaiser Wilhelm Society)を創立してその会長に就任。同会は1948年にマックス・プランク協会(Max Planck Gesellschaft)と改名され、ハーンは1960年以降その名誉会長を務めた。

貢献：

1905：ロンドンで純粋なラジウム塩の製造中に新しい放射性物質の放射性トリウム(RdTh = 同位体 ^{228}Th)を発見。

1906：モントリオールで研究中に放射性アクチニウム(^{227}Th)とトリウムC' (^{212}Po)を発見。

1907：メソトリウム I (MsTh₁ = ラジウムの天然同位体 ^{228}Ra)、メソトリウム II (MsTh₂ = アクチニウムの天然同位体 ^{228}Ac)並びにラジウムの親核種(immediate parent)であるイオニウム(Io = ^{230}Th)を発見。イオニウムは別にイェール・カレッジのアメリカ人の放射化学者ベルトラム・ボーデン・ボルトウッド(Bertram Borden Boltwood)によっても発見されていた。

1908：アクチニウム C'' (タリウムの同位体 ^{207}Tl)を発見。

1909 : 「放射性反跳」の現象並びにラジウム複合核 C'' (^{210}Tl) とトリウム複合核 C'' (^{208}Tl) を発見。

1918 : マイトナーと共に、アクチニウム系列内の長寿命の親核種である放射性元素プロトアクチニウム(元素第 91、 ^{231}Pa , 半減期 32,760 年)を発見⁶²。

1921 : 放射性原子の核異性体(nuclear isomerism) の初例となるウラン Z (= プロトアクチニウムの同位体(^{234}Pa))、ウラン X₂)を発見。

$^{234}\text{Pa}^{\text{m}}$ (UX2) \rightarrow γ 光子の放射(1.2 分)を伴う ^{234}Pa (UZ)

ハーンは、地質学上の年代を測定するストロンチウム法と呼ばれる放射性年代測定法を改良した。彼はまた、放射化学の方法を用いて、正常及び異常な結晶生成つまりごく微量の物質の吸収並びに沈殿に関する研究も行った。

1936 : マイトナー、シュトラスマンと共に、元素のネプツニウムとプルトニウム元素の親核種である人工の放射性ウラン同位体 ^{239}U を発見した⁶³。

1938 年 12 月～1939 年 1 月 : シュトラスマンと一緒に研究をしていた際に中くらいの重さの原子核の検知によりウラン(1938 年)とトリウム(1939 年)の核分裂を発見した^{64, 65}。

褒章等 :

オットー・ハーンは 1944 年にノーベル化学賞を受賞し、1966 年にはリーゼ・マイトナー並びにフリッツ・シュトラスマンと共にエンリコ・フェルミ賞も受賞した。ハーンはこ

⁶² O. Hahn, L. Meitner, "Die Muttersubstanz des Actiniums, ein neues radioaktives Element von langer Lebensdauer", *Physikalische Zeitschrift* 19 (1918) 208.

⁶³ L. Meitner, O. Hahn, F. Strassmann, "Über die Umwandlungsreihen des Urans, die durch Neutronenbestrahlung erzeugt werden", *Z. Phys.* 106 (1937) 249-270.

⁶⁴ O. Hahn, F. Strassmann, "Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle", *Naturwissenschaften* 27 (1939) 11-15 (論文は 1938 年 12 月 22 日に投稿され、1939 年 1 月 6 日に掲載された)。

⁶⁵ O. Hahn, F. Strassmann, "Nachweis der Entstehung aktiver Bariumisotope aus Uran und Thorium durch Neutronenbestrahlung; Nachweis weiterer aktiver Bruchstücke bei der Uranspaltung", *Naturwissenschaften* 27 (1939) 89-95 (論文は 1939 年 1 月 28 日に投稿され、1939 年 2 月 10 日に掲載された)。

の他にも世界中から多数の褒章や学問分野の賞を受けている。

彼はベルリン、ゲッティンゲン、ミュンヘン、ハーレ、ストックホルム、ウィーン、ボストン、マドリード、ヘルシンキ、リスボン、マインツ、ローマ、コペンハーゲンとインドに所在する 45 の学会に通常または名誉会員として選入され、また名声の高い勲章やメダル 37 個を国内からも国外からも授与されている。

1959：マインツに「オットー・ハーン研究所」、ベルリンには「ハーン・マイトナー研究所 (HMI) が創立された。火星と月のクレーター各一つと小惑星第 19126 号が彼の名誉「オットー・ハーン (Ottohahn)」と命名された。ドイツ化学会は「オットー・ハーン賞」を、またマックス・プランク協会は「オットー・ハーン・メダル」、さらにはベルリンの国際連合協会 (DGvN) も「オットー・ハーン平和メダル」を制定した。

1964 年には、全世界で 3 隻だけ、また欧州では唯一の原子力貨物船 NS 号が「オットー・ハーン」と命名された。

1971：当時合成されたばかりの 105 番目の元素がこれを合成したバークレーの研究チームによってハーニウム (Hahnium) と仮命名された。1994 年には原子番号 108 の元素も国際純正および応用化学連合 (IUPAC、International Union of Pure and Applied Chemistry) の無機化学学名命名委員会 (IUPAC Commission on Nomenclature of Inorganic Chemistry) によって「ハーニウム」と提案された。最終的には、これらの二つの元素の名前は第 39 回目の IUPAC 総会でドブニウム及びハッシウムと命名された。

2.7 リーゼ・マイトナー (Lise Meitner, 1878 年～1968 年)

原子番号 91 の放射性同位体プロトアクチニウム (^{231}Pa) の元素の共同発見者の一人、また核分裂を正しく解釈した最初の論文の共著者



挿絵 19：リーゼ・マイトナー

リーゼ・マイトナーは 1878 年 11 月 17 日にオーストリアのウィーンに生まれ、1968 年 10 月 27 日に英国のケンブリッジで死去した。

学歴：

1901 年：ウィーン大学でルドヴィッヒ・ボルツマン⁶⁶(Ludwig Boltzmann)の下で物理を専攻。

1906 年：ウィーン大学から女性として初めて博士号を取得。彼女の博士論文は非均質な固体内の熱伝導に関するものだった。

職歴：

1906：ウィーンでルドヴィッヒ・ボルツマンと共に研究活動を行った。

1907～1915：ベルリン大学の化学研究所で無給の研究者として勤務。1912 年から 1915 年までは最初の有給の仕事としてマックス・プランクの助手として働いた。

⁶⁶ ルドヴィッヒ・エドゥアルト・ボルツマン(Ludwig Eduard Boltzmann, 1844～1906)はオーストリアの物理学者でグラーツ、ウィーン、ミュンヘン並びにライプツィヒの各大学では教授を勤め、グラーツ大学の学長にもなった。彼は、気体内での分子の速度のマックスウェル - ボルツマン分布、マックスウェル - ボルツマン統計並びにエネルギーのボルツマン分布を含む、統計力学及び統計熱力学の各分野に於いての独創的な貢献で知られている。彼は、いわゆるボルツマン輸送方程式(Boltzmann transport equation)を通じて原子や分子の気体内での運動分布を説明したことによって最も知られている。

1912～1938：ベルリン－ダーレムのカイゼル・ヴィルヘルム研究所(KWI)で、最初は無給の客員研究員(1912～1913)、その後 1913 年から 1918 年までは被雇用者として勤務し、1918 年以後やっと放射能研究の物理部門の部長となった。第一次世界大戦中(1914～1916)はオーストリア軍隊のレントゲン看護婦及び技術者として自発的に活動に従事した。彼女は 1922 年にベルリン大学で女性としてはドイツ初の准教授(Dozent)となり、また 1926 年には初の女性教授となった。ドイツのオーストリア併合の後、ユダヤ人であった彼女はナチの迫害を逃れるため 1938 年 7 月 13 日にベルリンからストックホルムに逃れた。

1907～1938：オットー・ハーンと 30 年以上にわたって放射能の共同研究を行い、周期表の右側に位置する新しい放射性の変換生成物(transformation products)を幾つも生成した。1934 年以降、ジョリオ＝キュリー夫妻が人工放射能を発見し、フェルミが中性子を核反応に使用した後は、マイトナーはハーン並びにフリッツ・シュトラスマンと共にウランとトリウムの中性子照射に関する過程の共同研究に従事した。

1938～1947：マンネ・シーグバーン⁶⁷(Manne Siegbahn)が所長のストックホルムの王立科学アカデミーの実験物理学研究所(ノーベル物理学研究所とも呼ばれる)に勤務。この研究所は 1988 年にマンネ・シーグバーン研究所と改名され、現在ではストックホルム大学の一部となっている。マイトナーは王立科学アカデミーからごく少額の奨学金を得たものの、公の称号は授与されなかった。1946 年には彼女はアメリカ合衆国の首都ワシントンにあるアメリカ・カトリック大学の客員教授を務めた。

1947～1960：ストックホルムの王立工科大学の研究教授。

貢献：

1918：オットー・ハーンと共に、アクチニウム系列の親核種で寿命の長い放射性元素のプロトアクチニウム(原子番号 91、半減期が 32,760 年の ^{231}Pa)を発見⁶⁸。

⁶⁷ カール・マンネ・ゲオルグ・シーグバーン(Karl Manne Georg Siegbahn, 1886～1978)はスウェーデンの物理学者で、1924 年に「レントゲン分光学的諸調査」によりノーベル物理学賞を受賞した。

⁶⁸ O. Hahn, L. Meitner, "Die Muttersubstanz des Actiniums, ein neues radioaktives Element von langer Lebensdauer", *Physikalische Zeitschrift* 19 (1918) 208.

1923: 今日では「内部転換(internal conversion)」として知られている壊変電子(decay electron)が即時に K-電子を放出する現象を調査して説明した⁶⁹。

1930: W. オートマン(W. Orthmann)と共に、チャドウィックとエリスが観察した核の β 壊変の際に起こる連続的なエネルギースペクトルを追認した。後にこうした観察がヴォルフガング・パウリ(Wolfgang Pauli)の中性微子(ニュートリノ)存在の提唱につながった⁷⁰。彼女はまた H. H. ハップフィールド(H. H. Hupfield)と共に波長の短い γ 放射線の散乱に関する測定を行い、これがクライナー-仁科の公式と一致することを発見した⁷¹。

1936: ハーン、シュトラスマンと共に、ネプツニウムとプルトニウムの先行核(precursor)である人工放射能のウランの同位体 ^{239}U を発見した⁷²。

1938 年 7 月～1939 年 1 月: オットー・フリッシュと共に、世界に先駆けて核分裂過程を物理学的見地から解釈した⁷³。

褒章等:

ライプニッツ・メダル(Leibniz Medal、ベルリン科学アカデミー、1924 年)、リーベン賞(Lieben Prize、ウィーン科学アカデミー、1925 年)、エレン・リチャーズ賞(Ellen Richards Prize、女性科学者援助協会、1928 年)、科学芸術賞(Prize for Science and Art、ウィーン市、1947 年)、マックス・プランク・メダル(Max Planck Medal、ドイツ物理学会、1949 年)、オットー・ハーン賞(Otto Hahn Prize、1954 年)、シュルザー・メダル(Schlözer Medal、ゲッティンゲン大学、1962 年)、エンリコ・フェルミ

⁶⁹ L. Meitner, "Das beta-Strahlenspektrum von UX1 und seine Deutung", *Z. Phys.* 17 (1923) 54-66.

⁷⁰ L. Meitner, W. Orthmann, "Über eine absolute Bestimmung der Energie der primären beta-Strahlen von Radium E", *Z. Phys.* 60 (1930) 143.

⁷¹ L. Meitner, H. H. Hupfield, "Über das Absorptiongesetz für kurzwellige γ -Strahlung", *Z. Phys.* 67 (1930) 147.

⁷² L. Meitner, O. Hahn, F. Strassmann, "Über die Umwandlungsreihen des Urans, die durch Neutronenbestrahlung erzeugt werden", *Z. Phys.* 106 (1937) 249-270.

⁷³ L. Meitner, O. R. Frisch, "Disintegration of Uranium by Neutrons: A New Type of Nuclear Reaction", *Nature* 143 (1939) 239-240 (1939 年 1 月 16 日に投稿、掲載は同年 2 月 11 日)。

賞(Enrico Fermi Prize、米国原子力委員会 (AEC)、1966 年)。

マイトナーは、1920 年から 1930 年にかけては放射化学、1944 年から 1945 年にかけては核分裂の分野で何度もノーベル賞授賞の候補者に推薦されたが結局受賞しなかった。

彼女はベルリン、コペンハーゲン、イエーテボリ、ゲッティンゲン、ハーレ、オスロ、ストックホルム、ウィーン等、多数のアカデミーや学会の外国人会員でもあった。またアデルフィ・カレッジ、ロチェスター大学、ラトガース大学、スミス・カレッジ並びにストックホルム大学から名誉博士の称号を授与された。

彼女は 1946 年にワシントン D.C.の国内女性報道記者クラブから「今年の女性(Woman of the Year)」に選ばれ、また 1957 年には西ドイツから市民級の功労勲章(Ordre pour le Mérite, Civilian Class)を授与された。

1959 年にはハーン・マイトナー研究所(Hahn–Meitner Institut(HMI))がベルリンに創立された。

2010 年 10 月 27 日には、1956 年に「オットー・ハーン・パウ」と改名されたカイゼル・ヴィルヘルム研究所が「自由大学ハーン・マイトナー・パウ」と再度改名された。

小惑星第 6999 号マイトナーは彼女の名前にちなんで命名されたものである。

幾つもの科学賞が彼女の功績を称えて設立された。西暦 2000 年以降、欧州物理学会が核物理学の優れた研究に対してリーゼ・マイトナー賞を授与している。2006 年からはイエーテボリ市の物理学センターもクングエルヴ市と共に彼女の功績を称えてリーゼ・マイトナー賞を授与している。

スウェーデンのルンド工科大学は彼女の名前にちなんで客員教授のポストを設立した。

リーゼ・マイトナーが 1938 年のクリスマスを過ごしてハーンとシュトラスマンの研究結果が核分裂との解釈を下したクングエルヴ市ロングガータン通りのウッドマンスカ邸は、2016 年に欧州物理学会(European Physical Society)から「欧州物理学会関連の歴史的史跡 (EPS Historic Site)」に指定された。

第 109 番目の元素は彼女の名前にちなんでマイトネリウム、 $^{268}_{109}\text{Mt}$ と命名されている。

参考文献

- [1] S.A. Moszkowski, “*Nuclear Fission*”; S.A. Moszkowski, C.W. Wong, “*Early nuclear physics*”, CWP archive “Contributions of 20th century Women to Physics – Some Physics History”, University of California; web site [w1] – 第 61 頁.
- [2] American Institute of Physics (AIP) archive, “*The discovery of fission*”; [w2].
- [3] V. Acosta, C. L. Cowan, B. J. Graham, “*Essentials of Modern Physics*”, Harper & Row Publishers Inc., New York (1973).
- [4] G. Marx, “*The voice of the Martians*”, Third, revised edition. Akadémiai Kiadó (Academic Press), Budapest 2001.
- [5] Edward Teller, “*Hiroshima – the psychology of a decision*”, ブダペストのエトヴェシュ大学 (Eötvös University)での講演、1993 年 11 月 25 日; [w3].
- [6] L. Szilárd, “*Leo Szilárd: His Version of the Facts*”, Eds: Spencer R. Weart, Gertrud Weiss Szilárd. The MIT Press (October 1980).
- [7] Leo Szilárd, UK 特許; [w4].
- [8] A. Michaudon “*From Alchemy to Atoms*”, Los Alamos Science reports 26 (2000) 62-73; [w5].
- [9] Enrico Fermi, “*Artificial radioactivity produced by neutron bombardment*”, ノーベル賞受賞記念講演、1938 年 12 月 12 日; [w6].
- [10] E. Fermi “*Possible Production of Element of Atomic number higher than 92*”, Nature 133 (1934) 898-899; [w7].
- [11] CWP archive “*Contributions of 20th Century Women to Physics – Prominent Women*” – University of California; [w1].
- [12] Ida Noddack, “*Über das Element 93*”, Zeitschrift für Angewandte Chemie 47 (September 1934) 653-655. 英語版は H. G. Graetzer, “*On Element 93*”; [w7].
- [13] Emilio Segrè, “*Enrico Fermi: Physicist*”, University of Chicago Press (1970), 第 76 頁.
- [14] E. Segrè, Autobiography “*A Mind Always in Motion*”, University of California Press, Los Angeles (1993), 第 91 頁; [w8].
- [15] I. Noddack, “*Bemerkung zu den Untersuchungen von O. Hahn, L. Meitner und F. Straßmann über die Produkte, die bei der Bestrahlung von Uran mit Neutronen entstehen*”, Naturwissenschaften 27 (1939) 212 – 213 (この論文は 1939 年 3 月 10 日に投稿され、同年 3 月 31 日に掲載された).

- [16] Otto Hahn, “*From the natural transmutations of uranium to its artificial fission*”, ノーベル賞受賞記念講演、1946 年 12 月 13 日; [w6].
- [17] R.L. Sime, “*Lise Meitner – A Life in Physics*”, University of California Press, Berkeley (1996), chapter 9-11, 14.
- [18] K. Hoffmann, “*Otto Hahn Achievement and Responsibility*” (J.M. Cole がドイツ語から翻訳), Springer (2001).
- [19] O. Hahn, L. Meitner, “*Die Muttersubstanz des Actiniums, ein neues radioaktives Element von langer Lebensdauer*”, Physikalische Zeitschrift 19 (1918) 208-218.
- [20] L. Meitner, O. Hahn, F. Strassmann, “*Über die Umwandlungsreihen des Urans, die durch Neutronenbestrahlung erzeugt werden*”, Zeits. Physik 106 (1937) 249-270.
- [21] L. Meitner, O. Hahn, F. Strassmann, Zeits. Physik 109 (1938) 第 538 頁.
- [22] R.L. Sime “*The Search for Transuranium Elements and the Discovery of Nuclear Fission*”, Physics in Perspective (PIP) 2 (2000) 48–62.
- [23] Edwin M. McMillan, “*The Transuranium Elements: Early History*”, ノーベル賞受賞記念講演、1951 年 12 月 12 日; [w6].
- [24] I. Curie, P. Savitch, “*Sur les radioéléments formé dans l’uranium irradié par les neutrons*”, J. Phys. Rad. 8 (August 1937) 385-387.
- [25] I. Curie, P. Savitch, “*Sur le radioélément de période 3.5 heures formé dans l’uranium irradié par les neutrons*”, Comptes Rendus 206 (1938) 906-908; “*Sur la Nature du Radioélément de Période 3.5 Heures Formé dans L’Uranium Irradié par les Neutrons*”, Comptes Rendus 206 (1938) 1643-1644 (1938 年 8 月 1 日に掲載された).
- [26] I. Curie, P. Savitch, “*Sur les Radioéléments Formés dans L’Uranium Irradié par les Neutrons II*”, J. Phys. Rad. 9 (1938) 355-359 (1938 年 7 月 12 日に投稿され、同年 10 月に掲載された).
- [27] Otto Hahn, Fritz Strassmann, “*Über die Entstehung von Radiumisotopen aus Uran durch Bestrahlen mit schnellen und verlangsamten Neutronen*”, Naturwissenschaften 26 (1938), 755-756 (1938 年 11 月 8 日に投稿され、同年 11 月 18 日に掲載された).
- [28] Frank Settle, “*Nuclear Chemistry - The Discovery of Fission (1938)*”, General Chemistry Case Studies; [w9].
- [29] O. Hahn, F. Strassmann, “*Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle*”, Naturwissenschaften 27 (1939) 11-15 (1938 年 12 月 22 日に投稿され、1939 年 1 月 6 日に掲載された).
- [30] O. Hahn, F. Strassmann, “*Nachweis der Entstehung aktiver Bariumisotope aus Uran und Thorium durch Neutronenbestrahlung; Nachweis weiterer aktiver Bruchstücke bei der Uranspaltung*”, Naturwissenschaften 27 (1939) 89-95 (1939 年 1 月 28 日に投稿され、同年 2 月

10 日に掲載された)。

- [31] O. R. Frisch, J. A. Wheeler, “*The discovery of Fission*”, Physics Today (November 1967) 43-48; [w2].
- [32] L. Meitner, O. R. Frisch, “*Disintegration of Uranium by Neutrons: A New Type of Nuclear Reaction*”, Nature 143 (1939) 239-240 (1939 年 1 月 16 日に投稿され、同年 2 月 11 日に掲載された); [w10].
- [33] O. R. Frisch, “*Physical Evidence for the Division of Heavy Nuclei under Neutron Bombardment*”, Nature 143 (1939) 276 (実験は 1939 年 1 月 13 日に実施された。論文は 1939 年 1 月 16 日に投稿され、同年 2 月 18 日に掲載された)。
- [34] L. Meitner, O. R. Frisch, “*Products of the Fission of the Uranium Nucleus*”, Nature 143 (1939) 471-472 (1939 年 3 月 6 日に投稿され、同年 3 月 18 日に掲載された)。
- [35] L. Meitner, O. R. Frisch, “*New Products of the Fission of the Thorium Nucleus*”, Nature 143 (1939) 637 (1939 年 3 月 26 日に投稿され、同年 4 月 15 日に掲載された)。
- [36] 2002 年 8 月 27 日にスウェーデンの国営テレビで放送された J.O.ニルソン(J.O.Nilsson)氏制作の番組 “The history of atomic energy program in West Sweden” の一場面。
- [37] R. B. Roberts, R. C. Meyer, L. R. Hafstad, “*Droplet Fission of Uranium and Thorium Nuclei*” Phys. Rev. 55 (4) (1939) 416–417 (公開実験は 1939 年 1 月 28 日の会議中に行われた。論文は同年 2 月 4 日に投稿され、同年 2 月 15 日に掲載された) — Dept. of Terrestrial Magnetism, Carnegie Institution of Washington.
- [38] R. D. Fowler, R. W. Dodson, “*Intensely Ionizing Particles Produced by Neutron Bombardment of Uranium and Thorium*”, Phys. Rev. 55 (4) (1939) 417–418 (実験は 1939 年 1 月 28 日に行われた。論文は同年 2 月 3 日に投稿され、同年 2 月 15 日に掲載された) — Chemical Lab., Johns Hopkins University, Baltimore Maryland.
- [39] G. K. Green, Luis W. Alvarez. “*Heavily Ionizing Particles from Uranium*”, Phys. Rev. 55 (4) (1939) 417 (1939 年 1 月 31 日に投稿され、同年 2 月 15 日に掲載された) — Radiation Lab., Dept. of Physics, University of California, Berkeley-California.
- [40] P. Abelson, “*Cleavage of the Uranium Nucleus*”, Phys. Rev. 55 (4) (1939) 418 (1939 年 2 月 3 日に投稿され、同年 2 月 15 日に掲載された) — University of California, Berkeley — California.
- [41] D. R. Corson and R. L. Thornton, “*Disintegration of Uranium*”, Phys. Rev. 55 (5) (1939) 509 (1939 年 2 月 15 日に投稿され、同年 3 月 1 日に掲載された) — Radiation Lab., Dept. of Physics, University of California, Berkeley — California .
- [42] E. McMillan, “*Radioactive Recoils from Uranium Activated by Neutrons*”, Phys. Rev. 55 (5) (1939) 509 (1939 年 2 月 17 日に投稿され、同年 3 月 1 日に掲載された) — Radiation Lab., Dept. of Physics, University of California, Berkeley — California.

- [43] R. B. Roberts, R. C. Meyer, P. Wang, “*Further Observations on the Splitting of Uranium and Thorium*”, Phys. Rev. 55 (5) (1939) 510-511 (1939 年 2 月 18 日に投稿され、同年 3 月 1 日に掲載された) – Dept. of Terrestrial Magnetism, Carnegie Institution of Washington.
- [44] H. L. Anderson, E. T. Booth, J. R. Dunning, E. Fermi, G. N. Glasoe, F. G. Slack, “*The Fission of Uranium*”, Phys. Rev. 55 (5) (1939) 511-512 (実験は 1939 年 1 月 25 日に行われた。論文は同年 2 月 16 日に投稿され、同年 3 月 1 日に掲載された) – Pupin Physics Lab., Columbia University, New York.
- [45] F. Joliot, “*Preuve expérimentale de la rupture explosive des noyaux d’uranium et de thorium sous l’action des neutrons*”, Comptes Rendus 208 (1939) 341-343. (実験は 1939 年 1 月 26 日に行われた。論文は同年 1 月 30 日に掲載された).
- [46] N. Bohr, “*Disintegration of Heavy Nuclei*”, Nature 143 (1939) 330 (1939 年 1 月 20 日に投稿され、同年 2 月 25 日に掲載された) – Inst. for Advanced Study, Princeton, New Jersey.
- [47] N. Bohr, “*Resonance in Uranium and Thorium Disintegrations and the Phenomenon of Nuclear Fission*”, Phys. Rev. 55 (4) (1939) 418-419 (1939 年 2 月 7 日に投稿され、同年 2 月 15 日に掲載された).
- [48] L. A. Turner, “*Nuclear Fission*”, Rev. Mod. Phys. 12 (1940) 1-29 (1939 年 12 月 6 日に投稿され、1940 年 1 月に掲載された).
- [49] R. B. Roberts, L. R. Hafstad, R. C. Meyer, and P. Wang, “*The Delayed Neutron Emission which Accompanies Fission of Uranium and Thorium*”, Phys. Rev. 55 (7) (1939) 664 (1939 年 3 月 10 日に投稿され、同年 4 月 1 日に掲載された) – Dept. of Terrestrial Magnetism, Carnegie Institution of Washington.
- [50] E.T. Booth, J.R. Dunning, F.G. Slack, “*Delayed Neutron Emission from Uranium*”, Phys. Rev. 55 (9) (1939) 876 (1939 年 4 月 17 日に投稿され、同年 5 月 1 日に掲載された) – Dept. Physics, Columbia University, New York.
- [51] H.L. Anderson, E. Fermi, H.B. Hanstein, “*Production of Neutrons in Uranium Bombarded by Neutrons*”, Phys. Rev. 55 (8) (1939) 797-798 (1939 年 3 月 16 日に投稿され、同年 4 月 15 日に掲載された) – Pupin Physics Lab., Columbia University, New York.
- [52] L. Szilárd, W. H. Zinn, “*Instantaneous Emission of Fast Neutrons in the Interaction of Slow Neutrons with Uranium*”, Phys. Rev. 55 (8) (1939) 799–800 (1939 年 3 月 16 日に投稿され、同年 4 月 15 日に掲載された) – Pupin Physics Lab., Columbia University, New York.
- [53] H. von Halban, F. Joliot, L. Kowarski, “*Liberation of neutrons in the Nuclear Explosion of Uranium*”, Nature 143 (1939) 470-471 (1939 年 3 月 8 日に投稿され、同年 3 月 18 日に掲載された); Nature 143 (1939) 680 (1939 年 3 月 21 日に投稿され、同年 4 月 22 日に掲載された).
- [54] H.L. Anderson, E. Fermi, L. Szilárd, “*Neutron productions and absorption in Uranium*”, Phys. Rev. 56 (3) (1939) 284–286 (1939 年 7 月 3 日に投稿され、同年 8 月 1 日に掲載された) – Pupin Physics Lab., Columbia University, New York.

- [55] W. H. Zinn, L. Szilárd, “*Emission of Neutrons by Uranium*”, Phys. Rev. 56 (7) (1939) 619–800 (1939 年 8 月 14 日に投稿され、同年 10 月 1 日に掲載された) – Pupin Physics Lab., Columbia University, New York.
- [56] N. Bohr, J. A. Wheeler, “*The mechanism of nuclear fission*”, Phys. Rev. 56 (1939) 426-450 (1939 年 6 月 28 日に投稿され、同年 9 月 1 日に掲載された).
- [57] A. O. Nier, E. T. Booth, J. R. Dunning, A. V. Grosse, “*Further Experiments on Fission of Separated Uranium Isotopes*”, Phys. Rev. 57 (8) (1940) 748. (1940 年 4 月 13 日に投稿され、同年 4 月 15 日に掲載された).
- [58] K. H. Kingdon, H. C. Pollock, E. T. Booth, J. R. Dunning, “*Fission of the Separated Isotopes of Uranium*”, Phys. Rev. 57 (8) (1940) 749. (1940 年 3 月 20 日に投稿され、同年 4 月 15 日に掲載された).
- [59] R. M. Friedman, “*The Politics of Excellence – Behind the Nobel Prize in Science*”, Henry Holt & Company, New York (2001).

フリードマンは自著の本に基づいた幾つかの劇の創作を計画し、その最初となったのが一幕劇「マイトナー女史を偲んで(*Remembering Miss Meitner*)」であった。この劇は 2002 年 4 月にスウェーデンで開催された第 4 回国際科学フェスティバルの「物理学の日」に初演された。
- [60] N. Crawford, R.L. Sime, M. Walker, “*A Nobel Tale of Postwar Injustice*”, Physics Today (September 1997), 26–32.
- [61] Nhu-Tarnawska Hoa Kim-Ngan and I. Pázsit, “*The discovery of Nuclear Fission – Women scientists in highlight*”. ISBN 978-91-633-1047-8. Göteborg (2008).
- [62] I. Bergström, “*Lise Meitner i Stockholm*”, KOSMOS(スウェーデン物理学者協会年報) 2008, 第 85 巻 (2008) 95 – 102.
- [63] R. L. Sime, “*Vad ligger i ett namn? – Otto-Hahn-Bau blir Hahn-Meitner-Bau*”, KOSMOS(スウェーデン物理学者協会年報) 2010, 第 87 巻(2010) 53 – 70.

ウェブリンク一覧

- [w1] CWP archive “Contributions of 20th Century Women to Physics”, University of California
<http://cwp.library.ucla.edu>
- [w2] AIP archive (American Institute of Physics)
<http://www.aip.org/history/mod/fission/fission1/01.html>
- [w3] E. テラーの講義; KFKI archive (Központi Fizikai Kutató Intézet – Central Research Institute for Physics):
英語版: <http://www.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz9905/teller.html>
(Fizikai Szemle 1999/5. 176.o.)
ハンガリー語版: <http://www.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz9401/tede9401.html>
(Fizikai Szemle 1994/1. 1.o.)
- [w4] レオ・シラード、英国の特許:
<http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&IDX=GB440023&F=0>
<http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&IDX=GB630726&F=0>
- [w5] 米国科学者連盟(FAS Foundation of American Scientists)
<http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/pubs/00818012.pdf>
- [w6] ノーベル賞受賞記念講義:
エンリコ・フェルミ: <http://nobelprize.org/physics/laureates/1938/fermi-lecture.pdf>
オットー・ハーン: <http://nobelprize.org/chemistry/laureates/1944/hahn-lecture.html>
マクミラン: http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1951/mcmillan-lecture.html
- [w7] フェルミ、ノダック、ハーンとシュトラスマンの論文(英語版とドイツ語版), マイトナーとフリッシュ並びにボーアの論文: <http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History>
- [w8] E. セグレの自伝: <http://ark.cdlib.org/ark:/13030/ft700007rb/>
- [w9] General Chemistry Case Studie – Nuclear Chemistry and the Community,
<http://www.chemcases.com/nuclear/nc-03.htm>
- [w10] L. Meitner, O. R. Frisch, Nature 143 (1939) 239-240.
<http://deutsche.nature.com/physics/19.pdf>

文中の図表と挿絵の一覧

図表 1 (1.2.1) マイトナー、ハーン並びにシュトラスマンが 1934 年から 1938 年の間に 3 種類の異なった反応過程から生成されたとした超ウラン諸元素。

図表 2 (1.2.3) オットー・ハーンとフリッツ・シュトラスマンが施行して核分裂生成物としてのバリウムの発見に繋がった化学分析。出典（英語の原版）：
<http://chemcases.com/nuclear/images/image38.gif>

図表 3 (参考資料 1) 核反応の図解

図表 4 (参考資料 2) 重核一つに遅速性中性子一つがもたらす分裂の概説図。

図表 5 (参考資料 2) 熱中性子の引き起こした U-235 の核分裂からの核分裂諸生成物の質量の分布。出典：
http://www.reak.bme.hu/nti/Education/Wigner_Course/WignerManuals/Budapest/DELAYED_NEUTRON.htm

図表 6 (参考資料 2) ウラン核分裂の際に放出されるエネルギー

挿絵 1 (1.1.1) アーネスト・ラザフォード卿 (1871～1937)

出典：AIP archive (American Institute of Physics) – AIP Emilio Segrè Visual Archives

<http://photos.aip.org>

挿絵 2 (1.1.2) アーネスト・ラザフォード卿 (1871～1937)

挿絵 3 (1.1.3) レオ・シラードとアルバート・アインシュタインが 1939 年 8 月 2 日にフランクリン・デラノ・ルーズベルト大統領に送った手紙に署名した出来事の 1946 年 1 月の再現

出典：<http://photos.aip.org>

挿絵 4 (1.1.3) 連鎖反応に関するシラードの 1934 年の英国の二つの特許の各第 1 頁からの抜粋。

情報源は次のデータベース： esp@cenet – Worldwide

<http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&IDX=GB440023&F=0>

<http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&IDX=GB630726&F=0>

挿絵 5 (1.1.4) ローマの研究チーム (1934 年)。左から：オスカル・ダゴスティーノ、エミリオ・セグレ、エドアルド・アマルデ、フランコ・ラセッティとエンリコ・フェルミ。

出典：E. セグレ (E. Segrè) の自伝。 <http://ark.cdlib.org/ark:/13030/ft700007rb>

挿絵 6 (1.1.5) イーダ・タッケーノダック (1896～1978)

出典：<http://www.tu-berlin.de/~ini-chemie/PLASMA/21/frauen.html>

挿絵 7 (1.1.5) 1934 年 9 月に発表されたイーダ・ノダックの論文の抜粋 (原文はドイツ語。原文中の An と Ph は本書の著者たちにより Al と Pb に訂正してある)。英語版からの日本語訳は本書の翻訳者による

出典: <http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History>

挿絵 8 (1.2.1) カイゼル・ヴィルヘルム研究所の実験室でのオットー・ハーンとリーゼ・マイトナー

出典: Chemical Heritage Foundation Collections

<http://www.chemheritage.org/classroom/chemach/atomic/hahn-meitner.html>

挿絵 9 (1.3.1) リーゼ・マイトナーが 1938 年にクリスマスを過ごしたクングスエルヴのロングガートン通りにあるウッドマン邸(Uddmanska huset)並びにその外壁に掛かっている 欧州物理学会 (EPS)からの「EPS の歴史的建築物」指定の標識。

出典: <http://www.fy.chalmers.se/conferences/inpc2004/Travel/Meitner>

挿絵 10 (1.3.1) 核分裂に関する最初の発表－1939 年 2 月 11 日ネイチャー誌に掲載されたマイトナーとフリッシュの論文からの抜粋。日本語翻訳は本書の翻訳者による

出典: <http://deutsche.nature.com/physics/19.pdf>

挿絵 11 (1.3.1) 西スウェーデンの原子力エネルギー研究プログラムを取り扱った映画のルポルタージュのなかに再現されているマイトナーとフリッシュの 1938 年クングスエルヴでの歴史に残るスキーの散歩

挿絵 12 (1.3.2) ジョージ・ワシントン大学構内の化学・物理学部の建物の入り口にある 1939 年 1 月 26 日の核分裂の公表を述べた青銅の銘板

出典: <http://www.gwu.edu/~physics/bohr-teller.htm>

挿絵 13 (2.1) アーネスト・ラザフォード卿

挿絵 14 (2.2) レオ・シラード

挿絵 15 (2.3) エンリコ・フェルミ

挿絵 16 (2.4) イーダ・タッケーノダック

挿絵 17 (2.5) イレーヌ・ジョリオークュリー

挿絵 18 (2.6) オットー・ハーン

挿絵 19 (2.7) リーゼ・マイトナー

伝記のウェブリンク一覧

アーネスト・ラザフォード(Ernest Rutherford)

http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1908/rutherford-bio.html

<http://www.rutherford.org.nz/biography.htm>

レオ・シラード(Leó Szilárd)

Leó Szilárd Online: <http://www.dannen.com/szilard.html>

Tibor Frank, “Ever Ready to Go: The Multiple Exiles of Leo Szilard”, *Physics in Perspective* 7 (2005) 204–52

<http://www.springerlink.com/content/j6314471l6lju833/>

エンリコ・フェルミ(Enrico Fermi)

<http://nobelprize.org/physics/laureates/1938/Fermi-bio.html>

Website of the Department of Energy (DOE) Research and Development (R&D) Accomplishments Database

<http://www.osti.gov/accomplishments/fermi.html>

Fermi National Accelerator Laboratory- FNAL: <http://www.fnal.gov/>

The Enrico Fermi award; <http://www.sc.doe.gov/fermi/>

イーダ・タッケ・ノダック(Ida Tacke-Noddack)

<http://cwp.library.ucla.edu>

イレース・ジョリオ・キュリー(Irène Joliot-Curie)

<http://nobelprize.org/chemistry/laureates/1935/JuliotCurie-bio.html>

<http://cwp.library.ucla.edu>

オットー・ハーン(Otto Hahn)

<http://nobelprize.org/chemistry/laureates/1944/hahn-bio.html>

<http://www.chemheritage.org/EducationalServices/chemach/ans/hms.html>

Klaus Hoffmann, “Otto Hahn: Nobel Prize and Atom Bomb”, (original in German „Otto Hahn, Konflikte eines Wissenschaftlers”), J.M. Cole (Translator), Springer (2001).

リーゼ・マイトナー(Lise Meitner)

<http://cwp.library.ucla.edu>

Lise Meitner on-line:

<http://www.users.bigpond.com/Sinclair/fission/LiseMeitner.html>

San Diego Supercomputer Center <http://www.sdsc.edu/ScienceWomen/meitner.html>

R.L. Sime, “Lise Meitner – A life in Physics”, University of California Press, Berkeley (1996).

著者の紹介



イムレ・パージット (Imre Pázsit) はスウェーデンのイエーテボリ市にあるチャルマース工科大学物理学部原子核物理及びプラズマ物理部門の教授である。1975 年にハンガリーのブダペストで博士号を取得。米国原子力学会並びにスウェーデンのイエーテボリ王立学術協会の会員。学術誌 "Annals of Nuclear Energy" の編集長。研究の関心は、原子炉物理を始め輸送理論、輸送粒子の揺動、原子炉診断や核保障措置への中性子雑音解析の応用及び先進的信号解析法と多くの分野にわたっている。レナルド・パル (Lénárd Pál) と「中性子の揺動一分岐過程の物理に関する論文」を共著 (Elsevier, 2008 年)。2016 年には日本政府から旭日中綬賞、またハンガリーの原子核技術協会からはレオ・シラード メダルを授与された。

ウェブサイト: <http://www.nephy.chalmers.se/staff-pages/imre>



ヌ・タルナフスカ ホア キム・ガン (Nhu-Tarnawska Hoa Kim-Ngan) はポーランドのクラコフ教育大学の物理学部で研究活動に従事。1993 年にアムステルダム大学から博士号を取得、2005 年にはクラコフ科学技術 AGH 大学から教授資格認定を修了した。科学分野の主な関心は物質科学、薄膜及びナノ構造体である。(科学的な論文出版の際の名前は N.-T. H. Kim-Ngan)

物理学史、特に女性物理学者たちの経験と運命に関する仕事は、彼女の講義内容にも、また彼女の学部若い女学生たちを励ますことにも関連している。

ウェブサイト: <http://www.tarnawska.up.krakow.pl>



核分裂は 20 世紀の最も重要な発見の一つで、科学や政治に多大の国際的な影響を及ぼしたばかりでなく、その核反応や核兵器をも含む適用はパラダイムシフトを引き起こしました。

この本は、核分裂が発見されるまでの興味深い様々な出来事の経緯を 20 世紀前半の核物理学の発展に関するより広い視野から扱っています。非常に重要な貢献をしたにも拘わらずその業績を認めてもらえなかった三人の女性の研究者たちの記述が当時の社会の価値観を反映しています。

本書の第一章には次のような出来事が記されています。1)最初に核反応を起こすことに成功したのはアーネスト・ラザフォードだったが、彼は核反応を利用して大規模なエネルギーを生産することは不可能だと信じ込んでいたこと(1919 年)。2)ジェームズ・チャドウィックの中性子の発見が一連の新たな核反応を引き起こす可能性を開いたこと(1932 年)。3)中性子を利用した連鎖反応に関するレオ・シラードの特許の取得(1934 年)。4)エンリコ・フェルミが低速中性子を使用して核分裂を引き起こすことに成功していながら、そのことが自分ではわからず、代わりにウランを分裂させることは不可能との結論を下したこと(1934 年)。5)オットー・ハーンがウランの中性子照射後にバリウムを発見したこと(1938 年 12 月)。そして最後に、6)核分裂の発見に何よりも貴重な貢献を成した三人の女性科学者たち(イーダ・タッケ・ノダック、イレヌ・ジョリオ・キュリーとリーゼ・マイトナー)の果たした役割(1934 年 9 月)。

イーダ・タッケ・ノダックは、ウランの中性子照射後に観察されたすでに知られていた幾つかの元素の同位体の一部は核分裂生成物である可能性があると最初に提唱しました(1934 年 9 月)。イレヌ・ジョリオ・キュリーは 1937 年の末に半減期が 3.5 時間の核分裂生成物ランタンを発見し、これが核分裂の発見への道を開くことになりました。リーゼ・マイトナーはオットー・フリッシュと共にウランの核分裂を最初に正しく解釈し、分裂したウランの核が一つ当たり 200MeV という膨大な量のエネルギーを同時放出すると見積もりました(1939 年 1 月)。

この本は、著名な科学者たちに関わる多数の歴史的な出来事、中でも核分裂の発見に関したハーンとマイトナーの文通を取り上げています。核物理学に慣れていない読者の方々のため、核反応並びに核分裂の過程を物理学上の観点から理解しやすいように、入門的な紹介が二つの参考資料として含まれています。第二章では、核分裂の発見に寄与した科学者たちの一生と彼らの貢献が伝記の形式で書かれています。