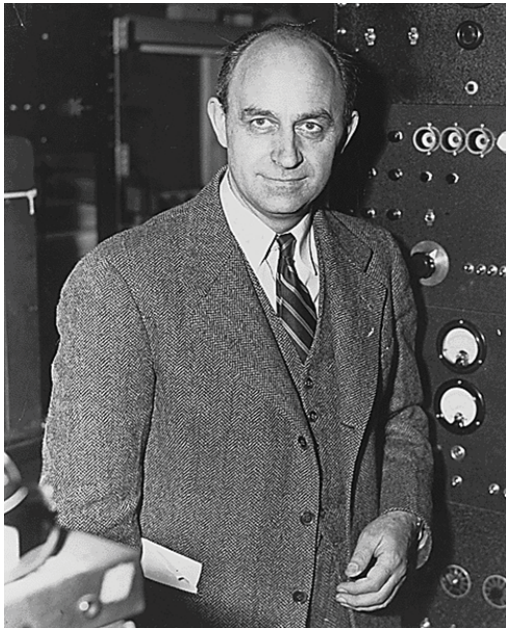


エンリコ・フェルミ(1901~1954)の功績

A meritorious deed of Enrico Fermi (1901-1954)

塩見 淳一郎 (東京大学)

*Junichiro SHIOMI (The University of Tokyo)**e-mail: shiomi@photon.t.u-tokyo.ac.jp*

エンリコ・フェルミ

1. はじめに

エンリコ・フェルミは、量子統計力学や原子核物理学を始めとする様々な分野で輝かしい業績を収めており、20世紀を代表する科学者の1人に数えられます[1]。また、理論と実験の両方を超一流にこなす「完璧な物理学者」とも評されます。加えて、教育者として次の世代の優れた研究者を育てており、人望が厚く人格者として敬愛されていたようです[2]。そういった総合的な評価の影響もあるのか、「フェルミ」の名が付くものは非常に多く、賞、研究所、天文観測所、原子炉、エネルギー、粒子、小惑星、元素、法則、パラドックスなど数えきれません。

フェルミの携わった研究としてまず思い浮かぶのは1938年のノーベル物理学賞[3]の受賞対象になった、減速中性子線照射による誘導放射能の研究でしょう。一方、「伝熱」という観点から見るとフェルミ・ディラック統計[4,5]の発見がフェルミ

の最大の功績であるかも知れません。これによって、例えば金属の比熱や熱伝導などの微視的な理解が格段に進みました。もちろん、これは伝熱に限らず、電子の振る舞いから宇宙の成り立ちまでの理解に繋がる熱力学の根幹を為す理論です。フェルミ・ディラック統計の発見に関しては、フェルミの伝記などでは数ページで済まされてしまうのが常ですが(何と言ってもフェルミが25歳までに仕上げた研究成果です)、本稿では重点的に触れることにします。

2. フェルミが育った時代

科学者を語る上で、その人が育った時代背景を知ることは欠かせません。特にフェルミが生きた20世紀前半は科学にとって特別な時代でした。フェルミがイタリアのローマで生まれたのは1901年であり、マックス・プランクが黒体放射の式を発表した翌年、アルベルト・アインシュタインの「Annus Mirabilis (奇跡の年)」の4年前です。プランクがエネルギーの量子性を導入して黒体放射の謎[6]を解いたのをきっかけに、それまで自然の真理とされていた古典力学に取って代わる新しい真理の探究が始まり、前期量子論が幕を開けたまさに革命の時代でした。

また、フェルミの研究の核となる放射能が発見されたのもその少し前です。1895年にヴィルヘルム・レントゲンによってX線が発見された翌年、アンリ・ベクレルによってウランの放射能が発見されています(その後ピエール・キュリーとマリイ・キュリーによって他の元素についても観測されました)[7]。そしてこれらから射出される放射線はアーネスト・ラザフォードやポール・ヴィラールによってアルファ、ベータ、ガンマの三種類に分けられました[8]。

放射線を用いた実験が可能になったことで、原子の正体を解明する研究も急速に進展しました。

1911年にラザフォードはアルファ線を金箔に照射することによって、中心に核が存在する現在の原子像（ラザフォードの原子模型）を見い出しています。後述のように、フェルミの研究はまさにこれらの知見や技術の発展の流れに乗ることによってスタートすることになります。

3. 学生・ポスドク時代

フェルミは幼少期から類まれなる記憶力を持ち、負けず嫌いで根気もあり、科学者になる適正を兼ね備えていたと言われていました[2]。幼いころに兄を亡くしてから猛烈に勉学に打ち込むようになり、みるみる才能を開花させ、いわゆるエリートコースを歩んで行きます。イタリアでは最難関とされるピサの高等師範学校（Scuola Normale Superiore in Pisa）に入学し全寮制教育を受けました。秀でた学生として有名であったようで、早くも量子力学を修得し、物理学の急速な進歩について行けなくなった物理学科の教授に依頼されて、当時アルベルト・アインシュタインによって発表されたばかりの相対性理論のレクチャーを行ったそうです[2]。そして、1921年（20歳）には大学3年生ながら早くも最初の学術論文を発表しています。

フェルミは理論物理で優れた業績を収める一方で、博士論文研究ではX線の実験をテーマに選びました。すでにこのころから実験と理論を両立するフェルミの研究スタイルを垣間見ることが出来ます。1922年に21歳で博士号を取得し、1922年から23年にかけてゲッティンゲンやライデンでポスドクを行っています。フェルミ・ディラック統計に繋がる研究を始めたのはこのころであり、1926年にローマ大学の教授に就任した年に、有名なフェルミ・ディラック統計力学の論文[4]を発表しています。実に、フェルミは弱冠25歳でした。

4. フェルミ・ディラック統計

フェルミはパウリの排他律原理に従う量子気体の新しい統計[3]を明らかにしました。同時期にポール・ディラックも同じ統計分布を独立に導き出したため、「フェルミ・ディラック統計」と呼ばれます。なお、ディラック自身が後に「フェルミ統計」と呼んだため、「フェルミ統計」と呼ばれることも多いようです。ディラックは非常に謙虚な人柄だったようで、このように他の研究者にクレジ

ットを譲った例がいくつもあるようです（例えば、状態間の遷移確率を与える「フェルミの黄金律」も実際にはディラックが導出したものです）。やがて、電子、陽子、中性子に代表されるフェルミ・ディラック統計に従う粒子を総称してフェルミ粒子又はフェルミオンと呼ぶようになります。

一般的な物理の教科書に載っている内容と重複する部分もありますが、ここでフェルミ・ディラック統計の導出について少し触れることにしましょう。フェルミ・ディラック統計は、平衡状態にある同種類のフェルミ（パウリの排他律に従う）粒子に対して適用されます。加えて、粒子同士の相互作用が無視できるとします。これは、 N 粒子系が単一粒子のエネルギー状態の足し合わせによって記述できることを意味します。

さて、フェルミの導出方法ですが、1926年の論文の英訳[4]を読むと、数学より物理的意味を重んじるフェルミらしい文に行き当たります。

“Reserving publication of the mathematical details of this theory to another occasion, we limit ourselves in this Note to showing the principles of the method and the results.”

と宣言した上で、

“Let us suppose now that we have to distribute among our N molecules the total energy $W=Eh\nu$ ($E=$ integer number); and let us label with $N_s < Q_s$ the number of molecules of energy $sh\nu$. It is easy to find that the most probable values of N_s are”

として、フェルミ・ディラック分布関数

$$N_s = \frac{\alpha Q_s}{e^{\beta s} + \alpha} \quad (1)$$

が記述されています（ α と β は W と N に依存する定数）。これは確かに「簡潔」ですが、本稿での解説に用いるにはいささか簡潔過ぎるように思えますので、ここでは独立に同じ結果を得ているディラック[5]の助けを借りて、フェルミ・ディラック分布関数の導出を追って見ることにします（なお、必要に応じて、変数の呼び名を原著から変えています）。

全粒子数が N 、全エネルギーが E の系を考えます。系が有する波動関数（又は状態）を同じエネルギーを持つグループに分け、 s 番目のグループに属する波動関数の数を A_s 、そのエネルギーを E_s 、それを占める粒子数を N_s とします。すると、 A_s

個の波動関数の中から N_s 個の粒子が占めるものを、重複を許さずに選ぶ組み合わせの数は、

$$W = \prod_s \frac{A_s!}{N_s!(A_s - N_s)!} \quad (2)$$

と表せます。従って、エントロピーは（スターリングの公式を用いて）、

$$\begin{aligned} S &= k_B \log W \\ &= k_B \sum_s \{A_s(\log A_s - 1) - N_s(\log N_s - 1) \\ &\quad - (A_s - N_s)[\log(A_s - N_s) - 1]\} \end{aligned} \quad (3)$$

で与えられ、これが平衡状態では極大を取ることより、

$$\begin{aligned} 0 &= \delta S = k_B \sum_s \{-\log N_s + \log(A_s - N_s)\} \delta N_s \\ &= k_B \sum_s \log\left(\frac{A_s}{N_s} - 1\right) \delta N_s. \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、全体の粒子数とエネルギーは変化しないので、

$$\sum_s \delta N_s = 0, \quad \sum_s E_s \delta N_s = 0. \quad (5)$$

これをラグランジュの未定乗数法を用いて解くことにより、以下の式が得られます。

$$\log\left(\frac{A_s}{N_s} - 1\right) = \alpha + \beta E_s \quad (6)$$

さらに、未定乗数 α 及び β は熱力学的物理量と関係づけることができ、温度 T と化学ポテンシャル μ を用いて

$$N_s = \frac{1}{e^{(E-\mu)/k_B T} + 1} \quad (7)$$

が導出されます。これがフェルミ・ディラック分布関数です（図 1）。

フェルミ・ディラック分布は例えば金属の比熱や熱伝導率を理解する上で多に役立ちました。それまではパウリ・ドルーデによる自由電子を気体運動論的に表したモデルが知られていましたが、このモデルの最大の問題点は、古典論に基づく電子の速度や比熱を用いていることでした[9]。それに対して、1933年にアルノルド・ソンマーフェルトはフェルミ・ディラック分布関数を用いて電子の比熱を求めることで、古典論では比熱が 100 倍程度過大評価されることを示しました[10]。それ

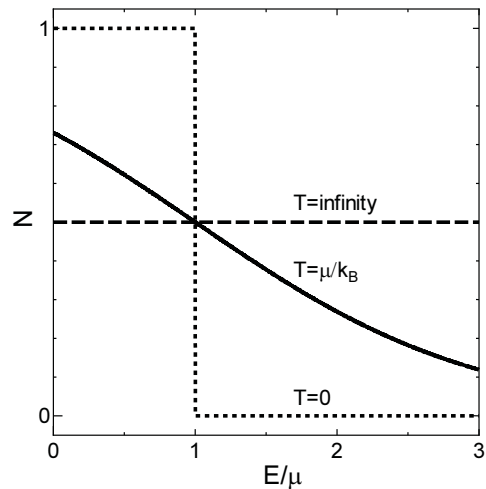


図 1 フェルミ・ディラック分布のエネルギー(E)及び温度(T)依存性。

までに金属であっても格子の比熱だけで凡そ説明が付くことが実験を基に分かっていましたが、フェルミ・ディラック統計によってその理由が初めて明らかになりました。

なお、上述の違いにも関わらず、ドルーデのモデルが熱伝導率やローレンツ数を比較的良く再現するのは偶然であることが知られています。ドルーデのモデルでは、比熱を過大評価すると同時に、電子速度を 10 倍程度過小評価したため、それらが相殺され、求める物性によってはソンマーフェルト理論で得られる結論とあまり変わらないのです[11]。

フェルミ・ディラック統計が役立つスケールの大きい例としては、白色矮星の安定性が有名です。白色矮星として知られるシリウス伴星（シリウス B）の質量は太陽のそれと凡そ等しい一方で、その半径は非常に小さく太陽の約 1/100 であることが 1990 年ごろまでに観測されていました。そうすると、太陽の密度は地球上の水と同程度ですので、白色矮星の密度は極めて高く、表面重力は太陽の何千倍、地球の何万倍であることになります。このような状態で、矮星が形を保っている理由がアーサー・エディントンをはじめとする天文学者の間でパラドックスとして議論されていました。

その答えは、パウリの排他則を満たすフェルミ・ディラック統計が与えることになります。このような高密度の星では原子は完全にイオン化して、電子は原子核から離れて電子気体として振る

舞います。フェルミ・ディラック統計に従うと、これらの電子はエネルギーの小さい状態から縮退しながら占めて行きますが、そのいくつかはエネルギーの高い状態を占めなければなりません。これによっていわゆる「縮退圧」が生じ、これによる圧力勾配と星自身の重力が釣り合って白色矮星はその形を保っていられます[11]。

5. フェルミ研究室

前述の通り、25歳にしてフェルミは早くも物理学の教授になりました。そのころのイタリアでは、まだ新しい現代物理学への抵抗感があり、フェルミはそれを打開するのに腐心したようです[2]。イタリアの若い世代に現代物理学を伝えることが重要と考え、1928年に「*Introduzione alla Fisica Atomica (Introduction of atomic physics)*」というイタリアで初めてとなる現代物理学の教科書を執筆し、それを基に講義を行っています。

新しい研究分野だったこともあって、学生の勧誘に苦労したそうですが[2]、フェルミの研究室には後に名を馳せる面々（フランコ・ラセッティ、エミリオ・セグレ、エドアルド・アマルディなど）が集まりました。このフェルミの研究チームは「*Ragazzi via Panisperna*」（Panispernaは研究室があった通りの名前、「*Ragazzi*」はイタリア語で「Boys」の意味）という愛称で呼ばれていました。研究会では、フェルミが解説する形で、当時発表されたばかりのエルヴィン・シュレディンガーの波動学[12]を始めとする現代物理学を議論していたようです[2]。フェルミはシンプルな解法を導き出す才能に非常に長けていたようで、複雑な数学や論理を好まず、まずはいわゆる「*Back of the envelope*」計算で当たりを付けた上で、後から正確な解を導くというスタイルを好んだと言われています。

フェルミの伝記[2]では、フェルミの教育者としての資質についても多く触れられています。何よりも学生に教えるのが好きだったようで、教えたことを学生が理解できないと、もう一度教える機会が得られるからと言って喜んだといいます。また、決して勉学や研究一辺倒というわけではなく、研究室の活動はスポーツや遊びとのバランスが取れていたようです。こうした研究生生活の中で、フェルミの研究スタイルがチームに浸透し行き、その後の様々な革新的研究が展開される舞台が整っ

て行きます。

6. 中性子物理学の誕生

Ragazzi via Panisperna は理論と実験の両方を高いレベルで実践できる強みを持って、原子核物理の研究を進めて行きます。起点となったのはその少し前に起った原子衝突実験による中性子の発見です。1911年にラザフォードが、アルファ粒子の散乱実験から、原子の中心には正電荷を帯びた極めて小さな原子核が存在することを証明しました。そしてこれが、ラザフォードの学生であったジェームズ・チャドウィックによる中性子の発見[13]に繋がり、原子核は正電荷をもつ陽子と電気的に中性な中性子によりなることが明らかになりました。

なお、チャドウィックより前にイレーヌ・ジョリオ・キュリーとフレドリック・ジョリオ・キュリー夫妻が、アルファ粒子を照射したホウ素から得る中性子を観測したのですが、キュリー夫妻はそれをガンマ線だと考えてしまいました。このように、後少しのところでのキュリー夫妻は中性子を発見することはできませんでしたが、人工放射性元素の発見で1934年にノーベル化学賞を受賞しています[14]。

これらの中性子と人工的な誘導放射能に関する発見を融合させたのがまさにフェルミの研究でした。フェルミは、ラドンから出るアルファ線をベリリウムに衝突させた際に生じる中性子をターゲット原子に衝突させることによって、放射能の誘導を実現しました[15]。驚くのは、フェルミらが様々な元素について網羅し、40以上の人工放射性同位元素を発見している点です。そして、放出された粒子の種類、エネルギー量、半減期などを測定する中で、照射を行う台が木製の場合と大理石の場合で放射能の強度が異なることを見つけました。フェルミらは、この原因が材質によって中性子が減速される度合いが異なるからであると推測し、より効果的に中性子を減速させるパラフィンを用いて実験を行うことによって、速度の遅い中性子の方が効果的に誘導を引き起こすことを明らかにします。この成果をきっかけに中性子物理学という新たな学術分野が誕生し、フェルミは1938年にノーベル物理学賞を受賞します[3]。

実は、一連の実験の中でフェルミは中性子がウ

ラン原子を分裂させ、小さな原子になっている手掛かりを観測していたようですが[16]、この時点ではそれが核分裂であることを知りませんでした。どうやら（恐らく **Back of the envelope** 計算をもとに）中性子がそれよりも重い原子を分裂させるだけのエネルギーを持てるとは思っていなかったようで、イダ・ノダックの指摘[17]にも関わらずその可能性を除外していました。

ノーベル賞の受賞対象となった研究の他にも、フェルミは様々な成果をこの時期にあげています。その1つとして有名なものに、「ニュートリノ」の概念を導入したベータ崩壊の理論に関する研究があります。当時、ベータ崩壊の際のエネルギー保存則が満たされないことが議論されており、それを説明するために、発生したエネルギーが全て電子のエネルギーとなるのではなく、一部が「ニュートリノ」のエネルギーとなると説明したのです。しかし、この研究を *Nature* 誌に論文として投稿したところ、エディターから“*it contained speculations which were too remote from reality*”とリジェクトされてしまったと言われています[2]。それによってこの論文はイタリア語とドイツ語ではすぐ（1934年）に発表されたにも関わらず[18]、英語での発表は1939年まで遅れたそうです。歴史を見ると、新しい粒子の存在の提唱には苦勞が伴うことが多いようですが、フェルミもまたその洗礼を受けたようです。

7. アメリカ時代

1938年にフェルミはノーベル賞の受賞式のためにストックホルムを訪れた際に家族とともにアメリカに亡命します。当時台頭してきたムッソリーニのファシズムによる迫害を恐れてのことでした（フェルミの妻ラウラ・フェルミはユダヤ系でした）。これを機に、フェルミはコロンビア大学で研究を始めます。同年に、オットー・ハーンとフリッツ・シュトラスマンがウランに中性子線を照射することによってバリウムが生成されることを観測し、翌年にレーゼ・マイトナーとオットー・フリッシュが、それが核分裂であることを示します。このニュースがニール・ボーア[17]を介してフェルミらに伝わり、コロンビア大学の研究者チームにより核分裂の実験が盛んに行われました。そして、自身の研究の実用化や応用に携わること

に興味がなかったと言われるフェルミですが[2]、初の原子炉（シカゴパイル-1）の開発を通じて自立的な核連鎖反応を実現し、これによってマンハッタンプロジェクトの中核的な役割を担うことになります。

8. おわりに

本稿では、基礎科学に関する業績が集中しているフェルミの研究人生の前半を主に取り上げました。アメリカ時代以降のフェルミの活動については、当時の政治的背景と絡めて書かれた伝記や資料が多数ありますので、そちらに譲ることにします。また、フェルミのスタイルに従い、本稿ではなるべく数学を使わないように努めました。より厳密な式や議論については、多数ある物理学の教科書をご参照ください。

参考文献

- [1] Snow, C., *The physicists: A generation that changed the world*, Little Brown (1981).
- [2] Cooper, D., *Enrico Fermi: And the revolutions of modern physics*, Oxford Portraits in Science, Ed. Gingerich O., Oxford University Press, Inc. (1999); ダン・クーパー著、梨本治男訳、エンリコ・フェルミ、原子のエネルギーを解き放つ、オックスフォード科学の肖像シリーズ、大月書店(2007).
- [3] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1938/.
- [4] Fermi, E., *Sulla quantizzazione del gas perfetto monoatomico*, *Rendiconti Lincei*, 145 (1926). Zannoni, A., *On the quantization of the monoatomic ideal gas*, arXiv:cond-mat/9912229 (英訳).
- [5] Dirac, P. A. M., *On the theory of quantum mechanics*, *Proc. Royal Soc. London Ser. A*, 112-762, 661 (1926).
- [6] 花村克悟, マックス・プランクの功績, *伝熱*, 48-205, 32 (2009).
- [7] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1903/.
- [8] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1908/.
- [9] Drude, P., *Zur Elektronentheorie der metalle*,

- Annalen der Physik* 306, 566 (1900). Drude, P., "Zur Elektronentheorie der Metalle; II. Teil. Galvanomagnetische und thermomagnetische Effecte, *Annalen der Physik*, 308, 369 (1900).
- [10] Sommerfeld, A., Bethe H., Elektronentheorie der Metalle, Handbuch der Physik, 24, 333, Springer Verlag, Heidelberg (1933).
- [11] Kittel, C., Kroemer, H., Thermal physics, W. H. Freeman Company (1980).
- [12] 芝原正彦, エルヴィン・シュレディンガーの功績, 伝熱, 49-209, 72 (2010).
- [13] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1935/.
- [14] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1935/.
- [15] Fermi, E., Amaldi, E., D'Agostino, O., Rasetti, F., Segrè E. Radioattività provocata da bombardamento di neutroni III, *La Ricerca Scientifica*, 5, 452 (1934).
- [16] Fermi, E., Possible Production of Elements of Atomic Number Higher than 92, *Nature*, 133, 898 (1934).
- [17] Noddack, I., On Element 93, *Zeitschrift für Angewandte Chemie*, 47, 653 (1934).
- [18] Fermi, E., *Z. Physik*, 88, 161 (1934).
- [19] 村上陽一, ニールス・ボーアの功績, 伝熱, 49-206, 25 (2010).
-