

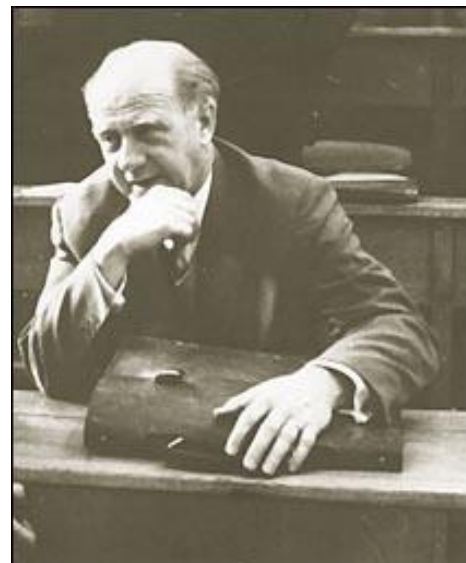
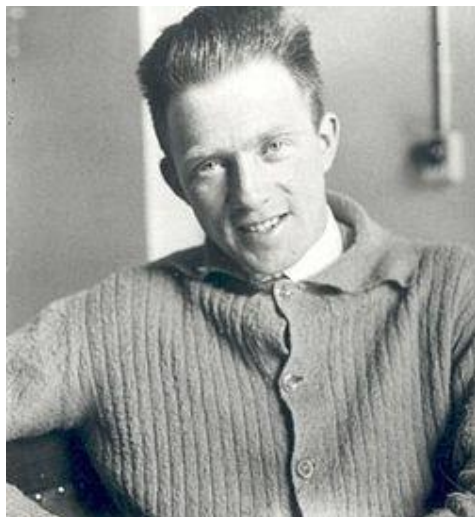


東海大学

ベント ヴォルフガング
東海大学・理学部・物理学科

Werner Heisenberg (1901 – 1976)

運が強い物理学者



歴史的な背景:

ドイツ帝国 1871 – 1933 年。

1919 – 1933 年
のドイツ帝国



1) 1871 – 1918: 帝国主義



最後の皇帝: Wilhelm II

1890 年までに、事実上 Bismarck
首相の支配下

2) 1919 – 1933: 共和国 (Weimar Republic)



Walter Rathenau
Weimar 共和国時代の外務大臣
1922 年 右翼派に暗殺

第一次世界大戦の敗北後の展開:

1918年、**Versaille 条約**: ドイツに巨大な賠償金支払いが命じられた。

1918/ 1919年、ドイツ各地で**革命、カオス**が発生。

例: 南ドイツでの共産主義派のクーデター
(Bavarian Soviet Republic, 1919年4/5月)。

1919年8月: **Weimar 共和国**の設立。

1920年頃: Versailles 条約のため、各地で**反共和主義の運動**

1923年: **右翼派のクーデター** (A. Hitler が刑務所へ)

その頃、べらぼうなインフレ:

パン 1 kg の値段は 10^{12} ドイツマルク!!

Heisenberg の父、2日毎にスーツケースで
給料を受け取った!

1923/24年のインフレ時代:
札でストーブをたく女性



Werner Heisenberg

1901年12月に Würzburg (当時 Bavaria 王国) に生まれ。

父: 古代ギリシア学の教授

1910年: 家族が都 München へ引っ越す。集中的にピアノ・レッスンがスタート。

1914年: 第一次世界大戦。

父は高齢で、Werner が少年だったため、両者の戦争奉仕が軽く、ラッキーだった。

父が戦争へ出発 (1914年)
右は Werner, 左は兄。



1920年代までに、ボーイスカウトに積極的に参加。毎週のハイキング、夏休みの数ヶ月間のキャンプについて熱意を示した。

1918年夏、Bavaria 州で。
Heisenberg は左から3番目。



1920 年：München 大学入学。

1年生のときから、A. Sommerfeld 教授の指示で原子論について本格的に研究した。

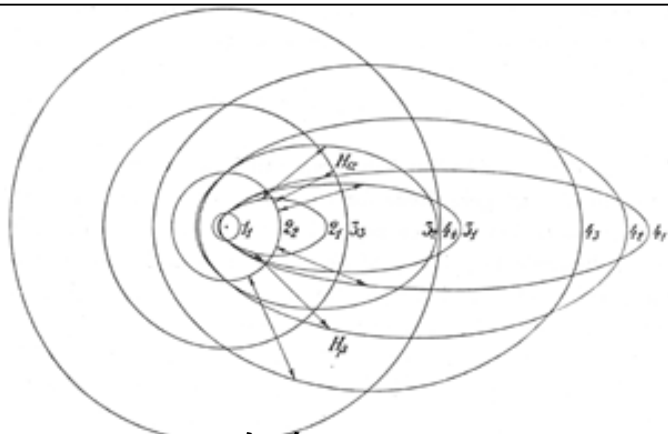


1919 年頃の
A. Sommerfeld (左)
N. Bohr (右)



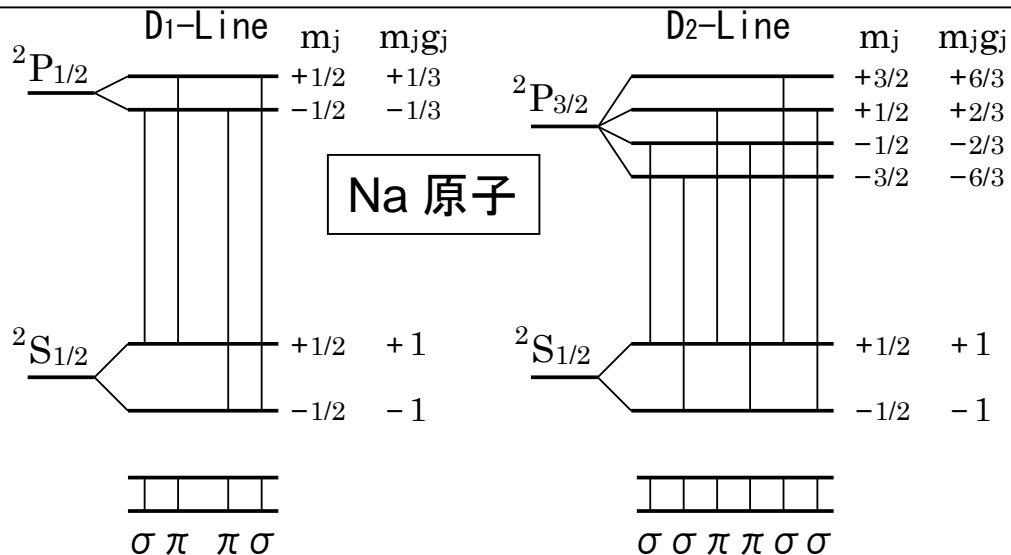
大学時代の仲間：
W. Pauli

Sommerfeld の当時の研究課題：
Bohr 原子模型の拡張
(楕円型軌道、角運動量の理論など)



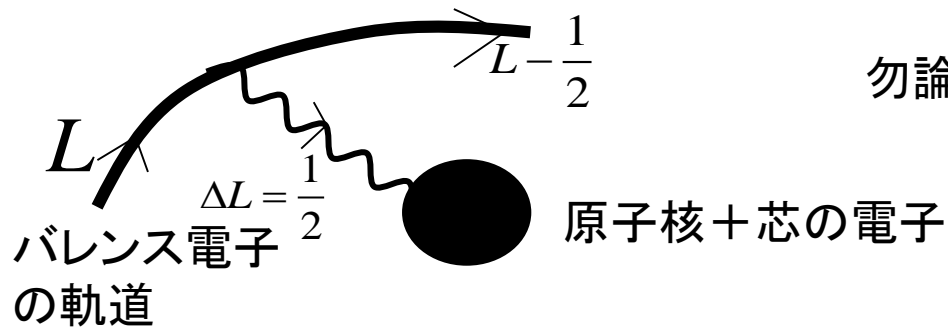
N. Bohr 自身のスケッチ

1年生 Heisenberg の最初の研究課題：
Zeemann 効果の説明！（当時の知識で不可能！）



2年生までに、Heisenberg が4通の論文を発表した。
Heisenberg の基本方針:「成功が手段を正当化する！」

半整数の角運動量 ($\hbar/2$ など) を記述するために、Heisenberg が「原子芯模型」
(atomic core model) を提唱した:



勿論、仲間 W. Pauli の厳しい批判を受けた。

1922年6月: Heisenberg が初めて N. Bohr に会う。
(Göttingen 大学で N. Bohr の講義のとき。)

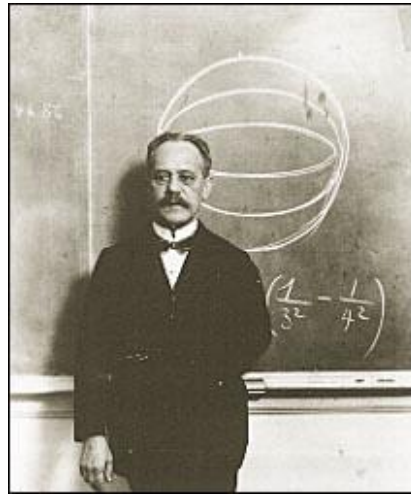
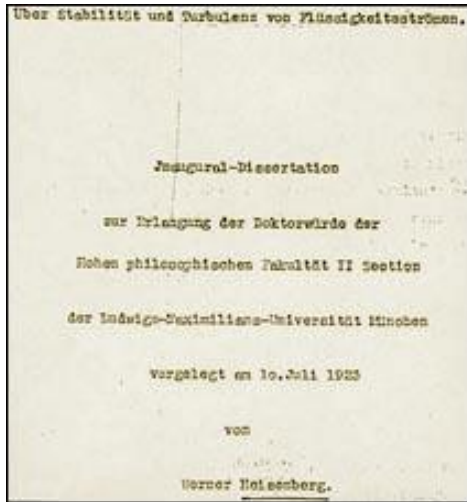
講義のとき、Heisenberg が立ち上がって、Bohr の助手であった H. Kramers の計算を批判した。最初は Bohr は怒ったが、講義の後一緒にハイキングして仲良くなった。

しかし、次の日に N. Bohr, M. Born と W. Heisenberg 達の議論で、「Heisenberg の原子芯模型がおかしい」と結論された。。。

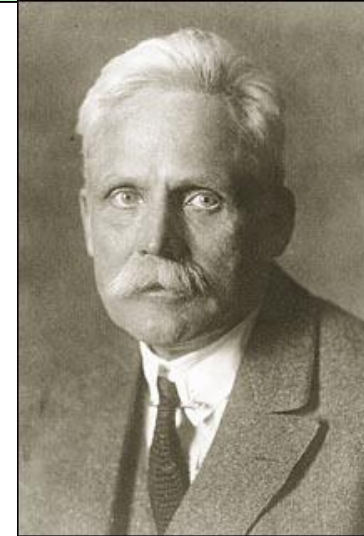


1920年代前半の
N. Bohr

1923年にHeisenbergは博士論文を提出。(流体力学の課題について。)博士号の口述試験がHeisenbergの悪夢となった。。。



理論の審査員
A. Sommerfeld 教授



実験の審査員
W. Wien 教授

博士論文の第1ページ
「流体の安定性および
乱雑性について」

W. Wien 教授: 「Heisenberg 君、顕微鏡の分解能について説明しなさい！」

W. Heisenberg: 「。。。すみません。。。」

W. Wien 教授: 「知らないのですか？だめですね。。。それでは、電池の働きについて説明しなさい！」

W. Heisenberg: 「。。。すみません。。。」

W. Wien 教授: 「君は落第だ！そんな人に博士号を与えてはいけない！」

結局、成績が1(最高)と5(最低)の平均(3)となった。

1924 – 1926 年: Göttingen 大学の M. Born 教授の助手。



M. Born

$|\Psi|^2$ の確率解釈、
散乱の量子論で有名。

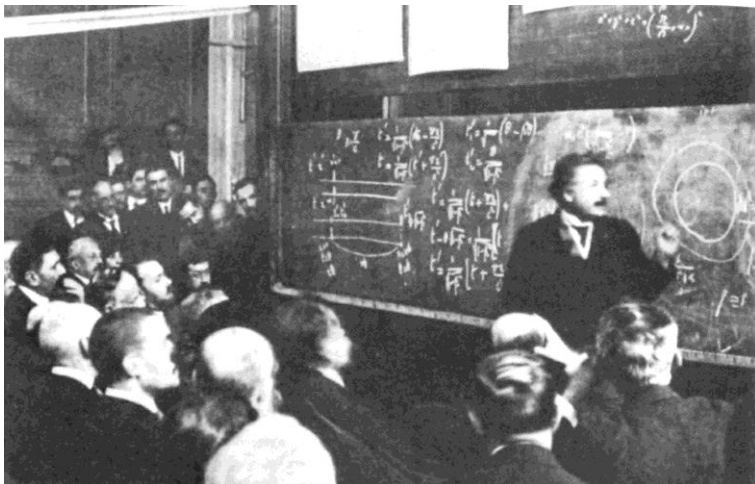
第1世界大戦中、兵士の
ときの写真

「Sommerfeld 先生から楽観的な考え方、
Born 先生から数学、そして Bohr 先生
から物理を学んだ。」
(Heisenberg の伝記から)

Göttingen での仲間が E. Fermi。しかし、当時の Fermi は恥ずかしがりやで、
うまく会話できなかった。

Göttingen 大学で始めて Einstein との出会い。

「15 分間だけの散歩中に、Einstein が量子論に対して100個以上の異論を唱えた。」



Einstein の講義で
満室の雰囲気

1924/25 年：N. Bohr の理論物理学研究所(コペンハーゲン)を訪れる。



N. Bohr の研究所、1920 年代の写真。

**「ここでデンマーク語を習って、毎日 Bohr と Kramers
3人で 9:00 から 24:00 まで仕事した。」**

(Heisenberg の自伝から)

H. Kramers がこの研究所の助手で、Heisenberg と
「原子と光の散乱」について研究し、ライバル関係。

その頃の Heisenberg の目標：「Bohr 模型における電子の軌道が観測不可能だ。従って、軌道の概念を殺すべきだ。(Kill the unobservable mechanical orbits in Bohr's model)」

1925 年 5 月：花粉のため完全ダウン。回復のために Helgoland (ドイツ北海の島)へ行く。



Helgoland

ここで「量子力学」が生まれた。

Über quantentheoretische Umdeutung
kinematischer und mechanischer Beziehungen.

Von W. Heisenberg in Göttingen.

(Eingegangen am 29. Juli 1925.)

In der Arbeit soll versucht werden, Grundlagen zu gewinnen für eine quantentheoretische Mechanik, die ausschließlich auf Beziehungen zwischen prinzipiell beobachtbaren Größen basiert ist.

Bekanntlich läßt sich gegen die formalen Regeln, die allgemein in der Quantentheorie zur Berechnung beobachtbarer Größen (z. B. der Energie im Wasserstoffatom) benutzt werden, der schwerwiegende Einwand erheben, daß jene Rechenregeln als wesentlichen Bestandteil Beziehungen enthalten zwischen Größen, die scheinbar prinzipiell nicht beobachtet werden können (wie z. B. Ort, Umlaufzeit des Elektrons),

「力学的な関係式の量子論的な解釈について」

Zeitschrift f. Physik 33 (1925) p. 879.

「この仕事で、観測可能な物理量のみに基づいた量子力学の基礎作りを試みる。」

方法: 古典物理学の $x(t)$, $p(t)$ などを「行列」に置き換える。

調和振動子を例として取上げ、ハミルトニアン $H = \frac{p^2}{2m} + \frac{m\omega^2}{2} x^2$ が対角化行列

であることを示し、その固有値を求めた:

Klassisch:

$$W = \frac{n h \omega_0}{2 \pi} \quad (22)$$

Quantentheoretisch [nach (7), (8)]:

$$W = \frac{(n + \frac{1}{2}) h \omega_0}{2 \pi} \quad (23)$$

(bis auf Größen der Ordnung λ^2).

Nach dieser Auffassung ist also schon beim harmonischen Oszillator die Energie nicht durch die „klassische Mechanik“, d. h. (22) darstellbar, sondern sie hat die Form (23).

式 (23) が「量子力学 I」で勉強した
1次元の調和振動子のエネルギー！

ミクロ世界の「離散的な物理量」を
行列の固有値として計算可能！

この発見について、Heisenberg の自伝を読みましょう！

「エネルギー保存則が成り立っているかどうかについて集中的に仕事した。ある夕べに、エネルギーの値の全てを表(エネルギー行列)にまとめようとした。最初の2、3個の数値でエネルギー保存則が成り立つことが分かったときに興奮して、多くの計算間違いもしてしまったが、早朝3時頃に計算が完成。。。私は凄く驚いて、原子の世界の美しさが見えてきたような気がした。。。興奮のために寝ないで、家を出て海岸へ歩き、高い岩の塔に登って日が出るまで待っていた。。。」

1926 年：Schrödinger の波動方程式が登場。Heisenberg と Schrödinger の間に、大論争が展開した。

1926 年 – 1927 年：コペンハーゲンで N. Bohr の助手。
(H. Kramers の後任)。

1927 年 冬：Bohr がスキーのためにノルウェーへ行った。研究所が静かになって、Heisenberg が不確定性原理を発見した：

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h$$

Heisenberg の具体例：X-線を使った顕微鏡。

しかし、Bohr がコペンハーゲンへ帰って、X-線顕微鏡の話が間違っていることを指摘し、「論文を発表するな」と強く命令。Heisenberg が強く反発、間違いのまま論文を投稿。。。 (結果は勿論正しい！)



1927年10月：Leipzig大学の教授になる。



1930年頃の
Leipzig大学
物理学科の建物

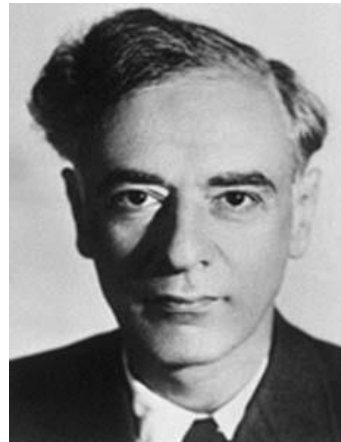


Heisenberg
のセミナー

1930年代、多くの学生と研究生達が量子力学、場の理論と原子核物理学の分野で Heisenberg と共同研究した：



Weizsäcker



Landau



Tomonaga



E. Majorana

1929年:世界一周。ドイツ → アメリカ → 日本 → 中国 → インド → ドイツ



Heisenberg (左1番), Dirac (左2番)
Chicago 大学、1929年。



左から3番目から: Nishina, Heisenberg,
Nagaoka, Dirac, Honda. 東京 1929年。



Heisenberg (左から4番目)
Bose (右1番目), インド、1929年。



左から: Bohr, Heisenberg, Pauli, Gamow,
Landau, Stern. コペンハーゲン、1930年。

1932年3月：Chadwickが中性子を発見。

当時は、中性子が陽子と電子から成ると思われた。

1932年に、Heisenbergが初めて「原子核が中性子と陽子から成る」と提唱し、原子核物理学の誕生！

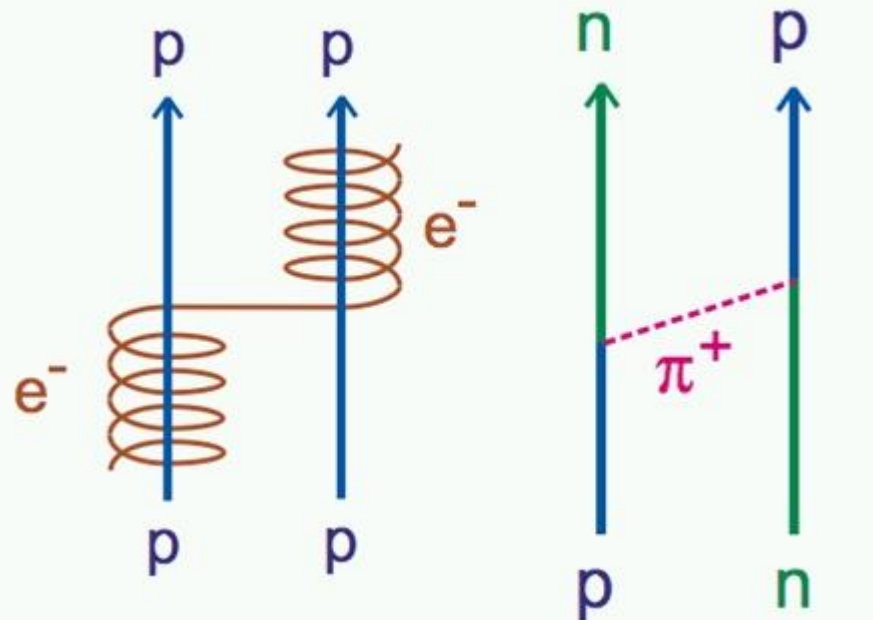
The Neutron and the Positron

The Existence of a Neutron.
By J. CHADWICK, F.R.S.
(Received May 10, 1932.)

§1. It was shown by Bothe and Becker* that some light elements when bombarded by α -particles of polonium emit radiations which appear to be of the γ -ray type. The element beryllium gave a particularly marked effect of this kind, and later observations by Bothe, by Marie Curie, Joliot, and by

The Positive Electron
CARL D. ANDERSON, California Institute of Technology, Pasadena, California
(Received February 28, 1933)

Out of a group of 1300 photographs of cosmic-ray tracks in a vertical Wilson chamber 15 tracks were of positive particles which could not have a mass as great as that of the proton. From an examination of the energy-loss and ionization produced it is concluded that the charge is less than twice, and is probably exactly equal to, that of the proton. If these particles carry unit positive charge, their curvatures and ionizations produced require the mass to be less than twenty times the electron mass. They will be called positrons. Because they are associated with other tracks, they are probably secondary particles.



Heisenberg の核力の理論 (1932)

Yukawa の核力の理論 (1935)

1933年：ヒトラーの権力が始まる。

Einstein, Schrödinger, Born など：直ぐドイツから亡命。

Heisenberg, Planck, Hahn, Laue など：ドイツに残る。

どうして Heisenberg がドイツに残ったか？

- 「私が若い研究者を指導する責任がある。大惨事から逃げては行けない。」

Heisenberg が Fermi に答える (1939 年)。

Heisenberg が 1939 年夏頃にアメリカへ渡り、戦争が始まる直前に「空っぽの船」でドイツへ戻った。

- 「あなたがドイツの物理の希望であり、亡命すればなにもいいことがない。」

M. Planck が Heisenberg に、1933 年、1938 年

Heisenberg がナチではなかったが、ナチスに反対もしなかった。

1933 – 1945 年の間に、自分の仲間、友人達を守るために色々活動したが、他の人を助けようとはしなかった。

例えば：1943 年、S. Goudsmit (スピンの発見者) の両親を迫害から守るように頼まれたが、なにもしなかった。結局、Goudsmit の両親は収容所で死亡した。

1933年11月：Heisenbergがノーベル賞を受賞（1932年の賞）：
「量子力学の発見のために」

1933年のノーベル賞は Schrödinger, Dirac へ。



Stockholm 駅に着く。
右から：Schrödinger, Heisenberg, Dirac



受賞式にて。右から Heisenberg, Dirac,
Schrödinger,

「Schrödinger, Dirac が私と等価の仕事をしたのに、どうして彼らが賞を分けて、私が1人でもらってしまったのでしょうか？ どうして M. Born, W. Pauli がもらっていないのか？ 非常に気になるところです。。。

Heisenberg が N. Bohr 宛てに (1933 年)

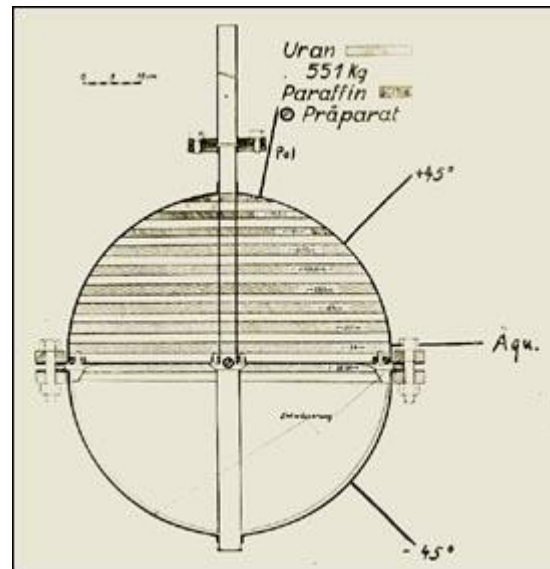
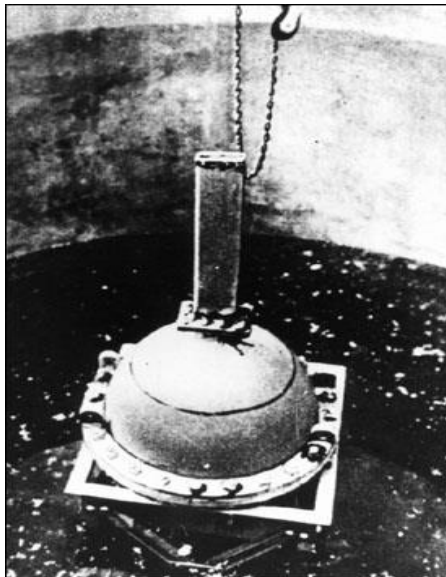
1939年：第2次世界大戦が始まる。

Heisenberg, Weizsäcker が「核分裂の軍事的応用研究」を命じられた。

Heisenberg が 1939 – 1945 年の間に、Berlin と Leipzig の研究所で、原子炉を作ることに力を入れた。



Berlin の「皇帝ウィルヘルム研究所」の物理の建物。
左側の塔の中に、Heisenberg の原子炉実験施設があった。



Leipzig での原子炉実験施設(左)
と Heisenberg のスケッチ(右)。

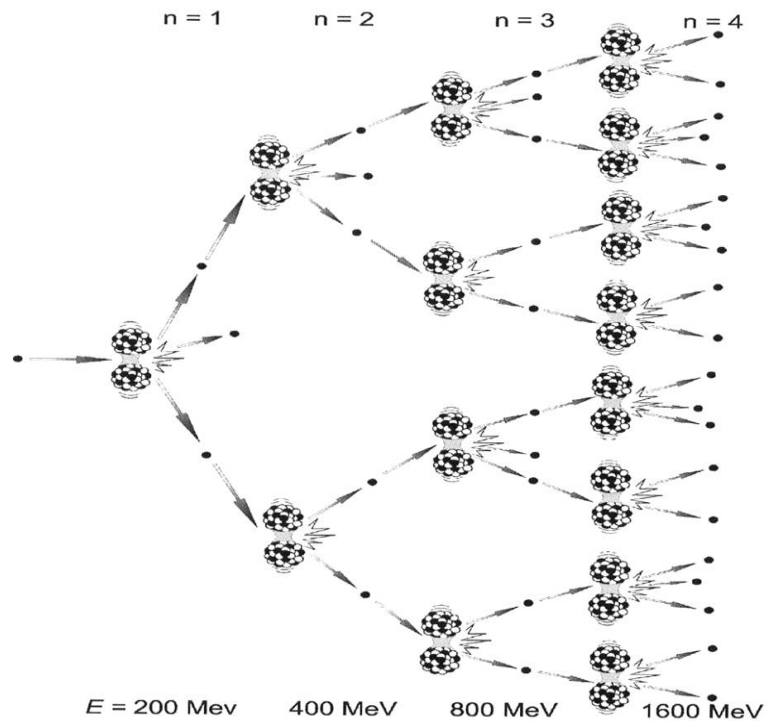
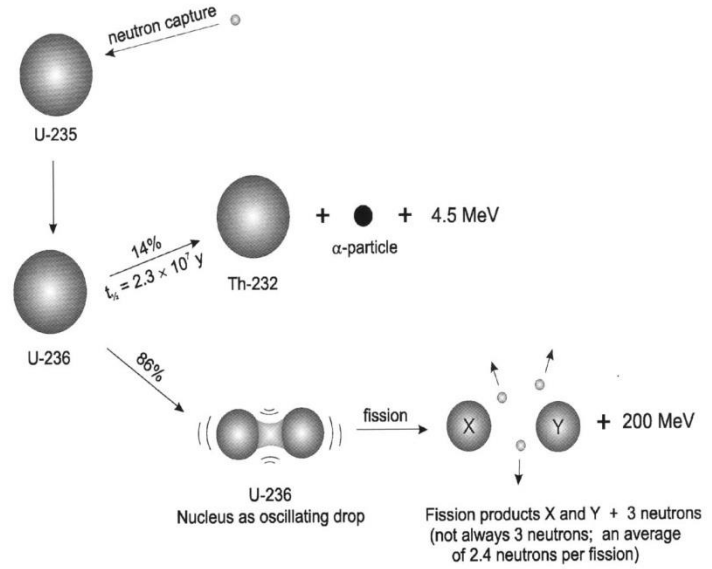
ウラニウム(燃料)とパラフィン
(減速量)の層を重ねた仕組み。

核分裂についての歴史的な背景:

● 核分裂は 1938 年に Hahn, Meitner, Strassmann に発見された。

● 1939 年: N. Bohr が ^{235}U が分裂可能なアイソトープと指摘した。(自然ウランウムの 0.7%)。遅い中性子による分裂が有利。

● 1939 年: F. Joliot が連鎖反応の可能性を指摘した。



Generation (n)	Minimum energy (MeV)
1	2.00×10^2
5	3.20×10^3
10	1.20×10^5
20	1.05×10^8
50	1.12×10^{17}
80	1.21×10^{26}

- 1939 年: E. Fermi がアメリカ海軍へ情報を伝えた。

- 1939 年: Einstein が米大統領 Roosevelt へ情報を伝えた。

Einstein の手紙, 1939 年

Albert Einstein
Old Grove Rd.
Nassau Point
Peconic, Long Island
August 2nd, 1939

F.D. Roosevelt,
President of the United States,
White House
Washington, D.C.

Sir:

Some recent work by E. Fermi and L. Szilard, which has been communicated to me in manuscript, leads me to expect that the element uranium may be turned into a new and important source of energy in the immediate future. Certain aspects of the situation which has arisen seem

- 1940 年: Frisch と Peierls 達がイギリスで原子爆弾について定量的研究をした。(ウラニウムの臨海質量、爆発エネルギーなどここで初めて。)

Frisch-Peierls の案文, 1940 年

8/14/40
~~Strictly Confidential~~ 57

Memorandum on the properties of a radioactive "super-bomb".

The attached detailed report concerns the possibility of constructing a "super-bomb" which utilizes the energy stored in atomic nuclei as a source of energy. The energy liberated in the explosion of such a super-bomb is about the same as that produced by the explosion of 1000 tons of dynamite. This energy is liberated in a small volume, in which it will, for an instant, produce a temperature comparable to that in the interior of the sun. The blast from such an explosion would destroy life in a wide area. The size of this area is difficult to estimate, but it will probably cover the centre of a big city.

In addition, some part of the energy set free by the bomb goes to produce radioactive substances, and these will emit very powerful and dangerous radiations. The effect of these radiations is greatest immediately after the explosion, but it decays only gradually and even for days after the explosion any person entering the affected area will be killed.

Some of this radioactivity will be carried along with the wind and will spread the contamination; several miles downwind this may kill people.

1940 年：ドイツ軍がデンマークを占領した。

1941 年 10 月： Heisenberg が Bohr を訪問し、「ドイツは戦争中に原子爆弾は作れない」メッセージを Bohr に伝えようとしたが、不思議な雰囲気の中で色々誤解があった。

Heisenberg の自伝で、1941 年の N. Bohr との会話について次のように書かれている：

H: 物理学者が原子力の応用研究しても道德の観点から問題ありませんか？

B: どうして？ この戦争で原子力を使うことが可能でしょうか？

H: はい、そうです、それが分っております。。。

ウラニウム焼却機 (uranium burner) は問題ありませんが、爆発的 (explosive) なものを作ることが技術的にとっても難しいです。何故ならば。。。

Heisenberg が「ドイツはこの戦争中に爆弾は作れない」というメッセージを伝えようとしたが、Bohr が全く逆に理解した。

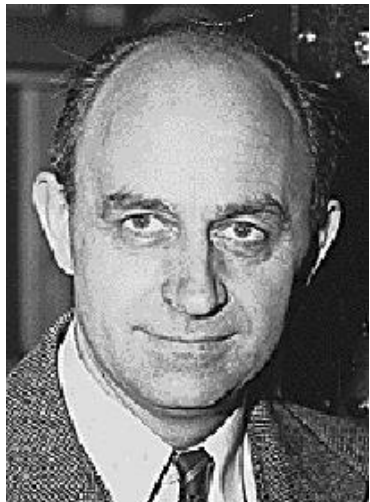
その後、N. Bohr がイギリスの Maud 計画、アメリカの Manhattan 計画に協力した。

ところが、1942年アメリカで最初の原子炉が成功した。

1942年12月2日、15:25から30分間、Chicago大学にて「Pile I」が動いた。
エネルギー率 0.5 ワット。



Chicago 大学キャンパス地下の Pile I.
燃料 (Uranium) と減速量 (Graphite) の
ブロックを 6 m の高さで重ねた。
関係者の中にはフェルミ、コンプトン、
ヴィグナー。



Pile I の創造者：
Enrico Fermi
イタリア出身天才物理学者
1938年ノーベル賞
同年アメリカへ亡命。



Pile I 成功の後、
乾杯に使った
シャンパンの瓶

アメリカでは Manhattan 計画がどんどん進んで行ったが、
ドイツでは Heisenberg の原子炉が最後まで成功しなかった！



1945 年 4 月、Heisenberg の原子炉施設がアメリカ
兵士達 (ALSOS Mission) に撤退される。

S. Goudsmit もその中にいた。。。

1945年5月4日、Heisenbergが自宅でアメリカの兵士達に逮捕。
(ドイツ科学者を捕まえる目的の ALSOS Mission, S. Goudsmit の指導の元。)

「その日、春の太陽が青空から輝き、周りの景色が光に溢れた。我々の山と湖が気に入ったかどうかアメリカの兵士に聞いてみた。彼が、ここはこの地球上で一番素晴らしいところだと答えてくれた。」

(Heisenberg の自伝から)

Heisenberg が S. Goudsmit (スピンの発見者) の調べを受けてから、イギリスの Cambridge 近くの村に收容された。(1946年1月までに。)



Farm Hall (イギリス)。



S. Goudsmit

Heisenberg との戦いが 1970 年代まで続いた。

ここで Heisenberg, O. Hahn, C.F. Weizsäcker, M. Laue 達が8ヶ月間收容され、全ての会話が盗聴された。

会話の記録によると、爆弾は作らなかった「道徳的な理由付け」が、ここでの4人の話し合いで決まった！

Heisenberg の最後の研究課題。。。。



1958年4月25日(M. Planckの誕生100周年)のとき、Heisenbergが「世界公式」(world formula)を紹介して、話題になった。上記のスライドに書かれている式が(現代物理の言葉で表すと)クォークの運動方程式である。本当の「クォーク」の理論はまだなかったが、Heisenbergはドイツ語の表現“Ur-materie”(原物質)を使った。