OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	電子をあやつる ： エレクトロニクスの過去・現在・未来
Author(s)	小林, 研介
Citation	高大連携物理教育セミナー報告書. 2015, 26
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/52372
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

電子をあやつる

エレクトロニクスの過去・現在・未来

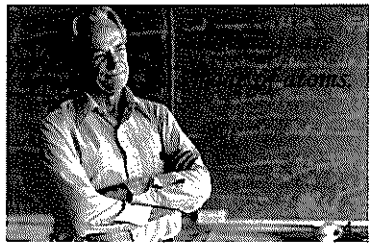
大阪大学理学研究科
小林　研介

前編：量子力学の発見

もしいま何か天変地異が起こって、
科学知識がすべて失われることになり、
たった一つの文章だけしか次世代の生物に
伝えられないということになったら、
最小の語数で最大の情報を含む
記述は何であろうか。

R.P. ファインマン（1918-1988）
アメリカの物理学者。素粒子理論。
教科書も名高い。シュウィンガー、
朝永振一郎とともにノーベル賞受賞。

私の考えでは、それは原子仮説だと思う。
すなわち、**すべてのものは原子** ―近い距離では互いに引き合い、あまり近づくと互いに反発しつつ、永久に動き回る小さな粒子― **からできている**、ということである。
これに少し洞察と思考をくわえれば、この一つの文の中に、
自然界に関する膨大な量の情報が含まれている
ことに気づくであろう。



ファインマン（1918-1988）
アメリカの物理学者

前編でお話ししたいこと

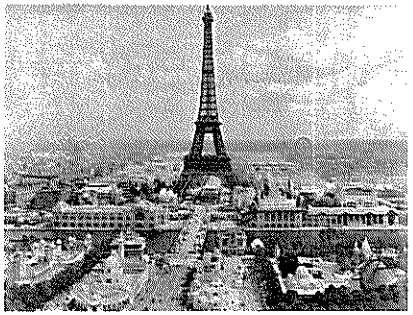
人類は原子から何を学んだのか？

- 量子力学の誕生　1900～1926
- 量子力学の発展　1926～現在
- 量子の時代　1990～

量子力学以前

～１９世紀末

百年前を振り返ってみましょう。



パリ万国博覧会（1900年）

物理学の状況１９世紀末

- 力学の完成（17世紀末）
- 電磁気学と熱力学の完成（19世紀）

※産業革命（18世紀半～19世紀）：蒸気機関

17－１９世紀の物理学の巨人たち　※高校物理では主に彼らの業績を学びます

ニュートン（1642-1727）　カルノー（1796-1832）　ファラデー（1791-1867）　マックスウェル（1831-1879）　ケルビン（1824-1907）　ボルツマン（1844-1906）　ジュール（1818-1889）

根源的な謎

- 原子
  - atom ＝ “分割できないもの” ギリシャ語
  - 分割不可能な最小構成単位は存在するか？
- 光
  - 波なのか粒子なのか？

量子力学の誕生 1926

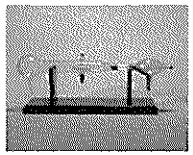
電子の発見

19世紀末頃には、電磁気学が完成し、「電荷」や「電流」があることは知られていましたが、その正体は不明でした。

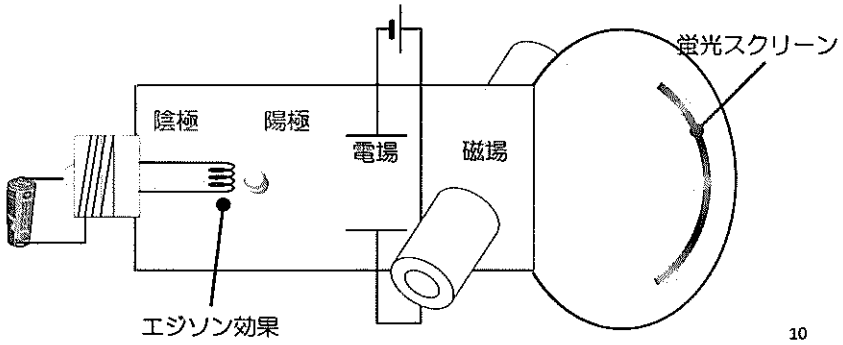
電子の発見　1897

ジョゼフ・ジョン・トムソン　(1856-1940)

フィラメント（陰極）から放射される陰極線が負の電荷をもった粒子で出来ていることを実証。



トムソンが用いた陰極線管



電子は軽い粒子である

電子一個の重さ＝約9.1×10^{-28}グラム
0.0000000000000000000000000000091グラム

ノーベル物理学賞（1906）

ジョゼフ・ジョン・トムソン

http://ja.wikipedia.org/wiki/

「誰の役にも何の役にも立たない電子に乾杯！」
("To the electron - may it never be of any use to anybody.")

http://www.nature.com/nphys/journal/v2/n8/full/nphys367.html#question

原子の構造

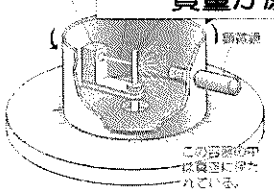
1900年頃に判明していた事実

- 原子は、負に帯電した電子と、正に帯電した「何か」で出来ている（らしい）。
- 「何か」は電子の数千倍の重さ（らしい）。

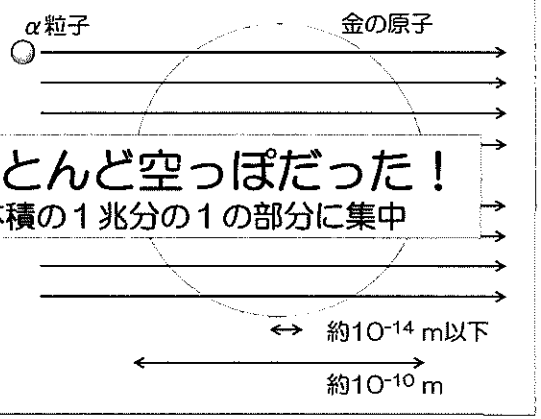
「原子核」の発見 1911

A・ラザフォード
（1871-1937）

イギリスの物理学者。ラザフォード散乱を発見し、ノーベル
物理学の



正電荷は、原子の中心の小さい領域に集中



物質は、ほとんど空っぽだった！
質量が原子体積の１兆分の１の部分に集中

量子力学の誕生

原子の構造や、その性質を理解するためには、
新しい物理学が必要でした。

ボーアの原子模型（1913年）

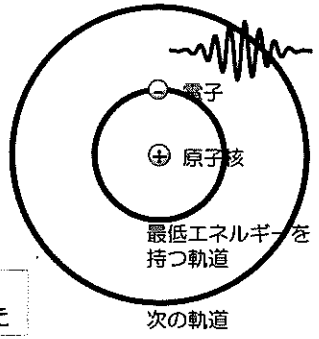
N・ボーア（1885-1962）

デンマークの物理学者。量子力学への扉を開いた一人。ノーベル賞受賞。

原子が崩壊しないのはなぜ？

ボーアの仮説
- ◆定常状態：原子内の電子は、特別に安定な軌道（定常状態）に存在。
- ◆振動数条件：電子は、ある軌道から別の軌道に移るとき、軌道エネルギーの差に対応した電磁波（光）を出す。

古典力学では非常識すぎる仮説だったが、
水素原子のスペクトルを驚異的な精度で説明した

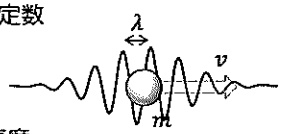


物質は波動である 1924

物質波

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

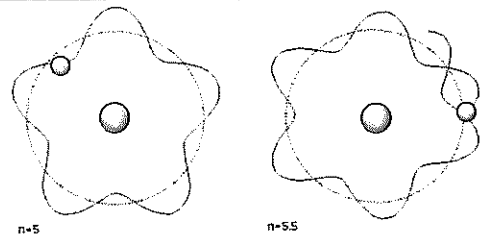
λ：波長　h：プランク定数　mv：質量×速度



ド・ブロイ（1892-1987）

1924年、「物質波」を提唱するが、荒唐無稽な仮説として無視される。しかし、1926年に、この仮説からシュレーディンガー方程式が導かれ、量子力学に結実。ノーベル賞受賞。

可能な軌道　　不可能な軌道

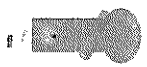


原子の中の電子は、軌道を周回して定常波を作れるときのみ、安定に存在できる。
（ボーアの仮説を説明）

量子力学の誕生

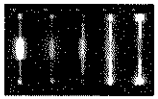
-1911

電子



原子核

発光



-1925

原子模型

物質波

光子

1926

量子力学

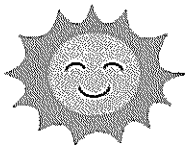
ミクロの世界を記述する方程式

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\Psi = \left(\frac{-\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V\right)\Psi$$

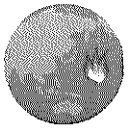
E.シュレーディンガー
（1887-1961）
波動力学の発見。ノーベル賞受賞。

W.ハイゼンベルク
（1901-1976）
行列力学と不確定性原理の発見。ノーベル賞受賞。

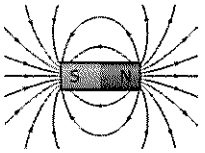
身の周りを眺めると…



太陽が輝く理由



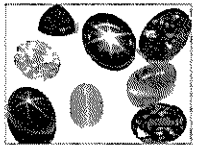
地熱の原因



磁石

炎の色

金属の性質



宝石

そこには量子力学があります

誰が原子を見たのか？

原子は小さい！

20世紀初めでも原子の実在を疑う人がいた
（オストワルド、マッハら）。

原子は仮説にすぎない。

原子の実在の証明（1911）
アインシュタインーペラン（ブラウン運動）

A.アインシュタイン
（1879-1955）
物理における数々の業績。
ノーベル賞受賞。

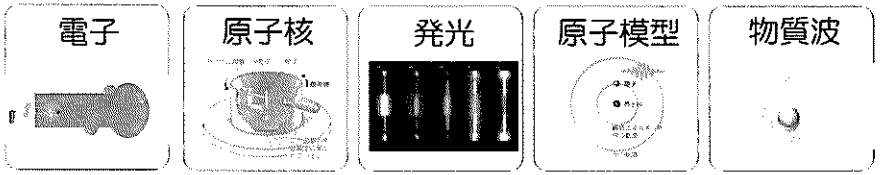
W.オストワルド
（1853-1932）
物理化学分野を確立。
ノーベル化学賞受賞。

原子（分子）はどのくらい小さいか？

大気中1立方センチメートルあたり、約100億×100億個存在。
もし、目の前の原子が見えたとすると、その大きさは、月面上の一円玉くらい。
もし、原子の重さが一円玉くらいだとすると、人の体重（50kg）は、地球と同じくらい。

まとめ1

すべてのものは原子からできている



- 原子を調べることで量子力学が発見されました。
- 量子力学は、皆さんの身の周りにあります。
- 現代は、原子一個を制御できる時代です。

次は、電子そのものを考えてみましょう

後編：電子一個を操作する

後編でお話ししたいこと

電子をあやつる

- 真空管の時代
- トランジスタの時代
- 量子の時代

真空管の時代

電子は…

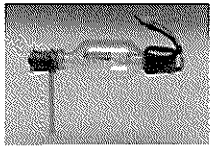
どのように発見されたのでしょうか？

どのように利用されるようになったのでしょうか？

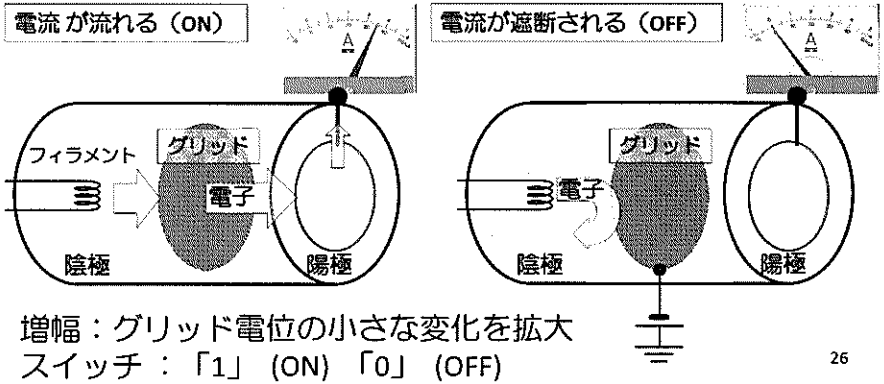
真空管の発明 1907年

リー・ド・フォレスト　(1873-1961)

真空管の発明によって電子工学の発展に寄与。
「エレクトロニクス時代の父」

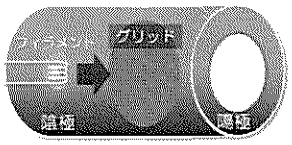


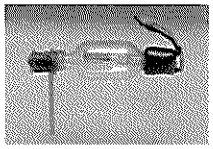
http://ja.wikipedia.org/wiki/



増幅：グリッド電位の小さな変化を拡大
スイッチ：「1」 (ON) 「0」 (OFF)

真空管は…





- フィラメントが必要　→　電力を消費
- 真空部分が必要　→　小型化が困難
- フィラメントが切れる　→　短寿命

コンピュータENIACの場合

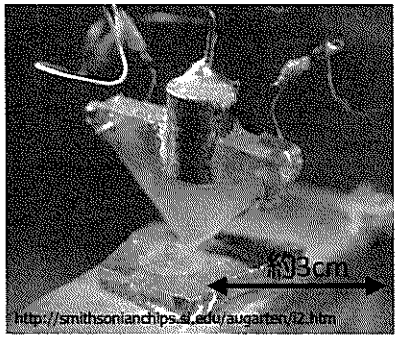
約2万本の真空管
幅24m×奥行0.9m ×高2.5m（30トン）
消費電力150kW
週に2～3本の真空管を交換

トランジスタの時代

真空管の欠点のすべてを克服する
トランジスタは、どのように
発展してきたのでしょうか？

トランジスタの発明　1947年12月23日

ゲルマニウム製の世界初のトランジスタ（点接触式）



トランジスタ（transistor）

変化する抵抗を通じての信号変換器

TRANsfer + re**SISTOR**

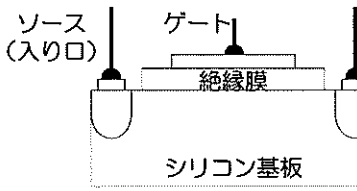
シリコン（ケイ素）

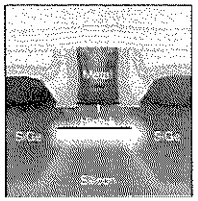
- 地球上で最も豊富な元素の一つ。
- 日常生活でも多用
- 典型的な「半導体」
- 超高純度が可能。
  99.9999999999999 % (15N)

ガラス、太陽電池、シリカゲル、
シリコンゴム（食器、美容）…

http://pcplus.techradar.com/node/3059

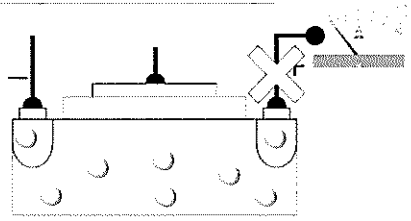
トランジスタの仕組み



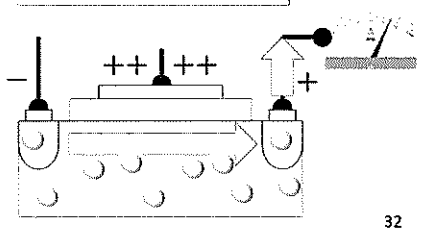


http://www.intel.com/pressroom/kits/advancedtech/ieee/HighK_IEDM2007_ppt.htm

ゲート電圧OFF→電流OFF



ゲート電圧ON →電流ON



世界の技術を支配する ベル研究所の興亡

単行本: 492ページ
出版社: 文藝春秋 (2013/6/28)

日本の半導体40年—ハイテク技術開発の体験から (中公新書) 菊池 誠

Google 菊池誠 物理学会 半導体

50年をかえりみる:半導体素子研究の周辺 - 日本物理学会

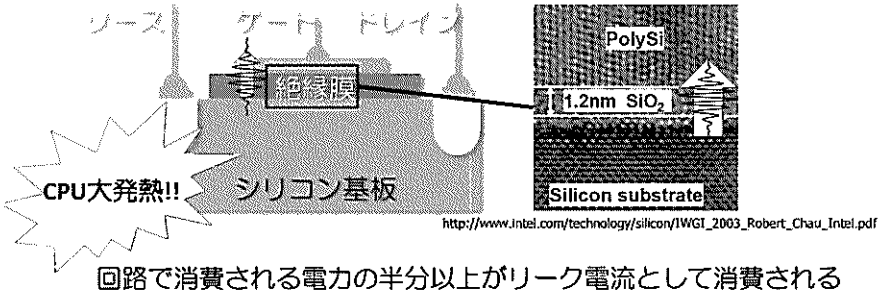
量子の時代

トランジスタが小さくなった結果、
ついに量子力学が支配する領域に到達しました。

トランジスタが小さくなると…

原子数個の厚みしかない薄い絶縁膜を使用。

電子は波として量子力学的にトンネル可能　→　リーク電流。

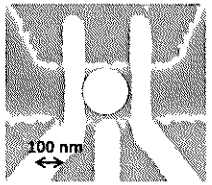


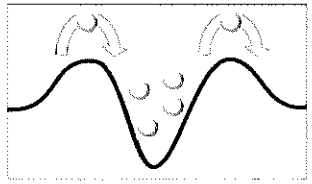
http://www.intel.com/technology/silicon/IWGI_2003_Robert_Chau_Intel.pdf

回路で消費される電力の半分以上がリーク電流として消費される

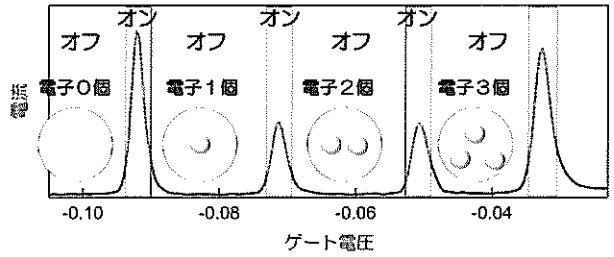
量子力学で動く新しい電子部品（量子デバイス）を作ろう！

単一電子トランジスタ





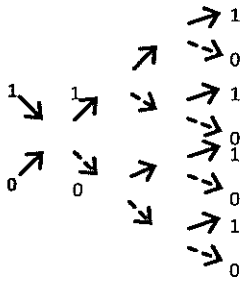
決まった数の電子を1ヶ所に
閉じ込めたトランジスタ。
電子を一個ずつ出し入れ可能。



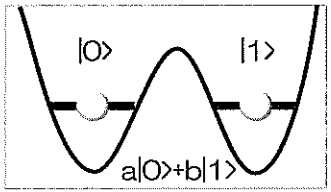
量子コンピュータ

<u>現在のコンピュータ</u>

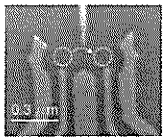
トランジスタをスイッチとして用いて、YesとNoを1と0に対応させて演算



<u>量子コンピュータ</u>



「重ね合わせ」を用いて
並列性を実現
↓
現在のコンピュータより
格段に性能の良いコン
ピュータの可能性

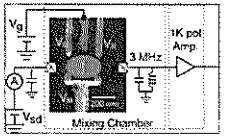


Nowack Science (2007)

私たちのとりくみ

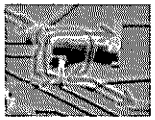
- 単一電子のスピンの制御

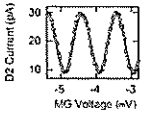
  Phys. Rev. Lett. (2011)



- 電子の波動性

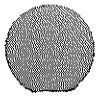
  Phys. Rev. Lett. (2010); Phys. Rev .B (2011)





- シリコンの新しい機能の開拓

  ネイチャー (2009)



シリコン基板

シリコンに磁気抵抗効果 東大化学研が発見

読売新聞（2009年3月23日）