

ミュージアム x ライブラリ 連続トークイベント

グローバル化する通信～腕木から5Gへ～

第2回

無線～忘れられたテクノロジー～

2019年12月5日（木）於アゴラ

無線通信の幕開け??

ROBINSON'S WIRELESS ELECTRIC SIGNALS,

THE SIMPLEST, CHEAPEST, and
Only Absolutely SAFE Electric Signals in Existence,

NOW IN SUCCESSFUL OPERATION ON THE
BALTIMORE AND OHIO,
PHILA., WILMINGTON & BALTIMORE,
PHILADELPHIA AND ERIE,
AND OTHER RAIL ROADS.

They work as AUTOMATIC BLOCKS with tell-tale alarms, OFFICE, STATION, ROAD CROSSING and SWITCH SIGNALS, and BROKEN RAIL DETECTORS. These signals have worked uninterruptedly through last winter regardless of rain, snow, slush or sunshine. Descriptive circulars on application.

MAY 1873.

WM. ROBINSON, St. Petersburg, Pa.

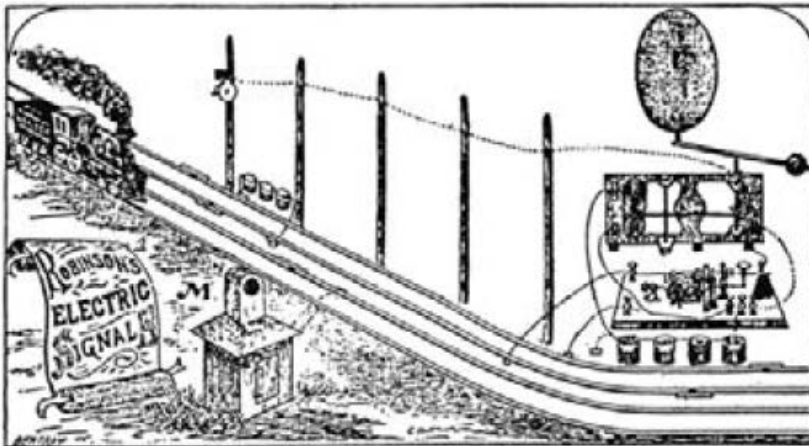


Figure 2.8 Robinson's 'Wireless Electric Signals'
Source: Brignano, 'History of Railway Signals', 1981

ロビンソンの**ワイヤレス**電気信号

1860年にウィリアム・ブル(英)が開発、1867年にアメリカのウィリアム・ロビンソンがアメリカの鉄道制御システムに取り入れた。

あらかじめ決められた制御区間内に列車が侵入したとき、レール対を車輪が電氣的に接続して自動的に鉄道警報サインを「危険」に設定。異なる制御区間のレールは互いに(間に木片を挿入して)絶縁している。

列車の移動に関する情報(現在位置、進行方向、進行の速さ、ここまでの距離)が、今後到着予定の各駅で知ることができた。

1872年、フィラデルフィア・エリー鉄道で正式採用され、1880年代にモースシステムに置き換えられるまで、アメリカの標準的な鉄道通信・警報システムとして使われた。

図引用: "History of Telegraphy", IET History of Technologies Series 26, Ken Beauchamp (2001) p. 39

ヘルツ以前の「無線」通信 1

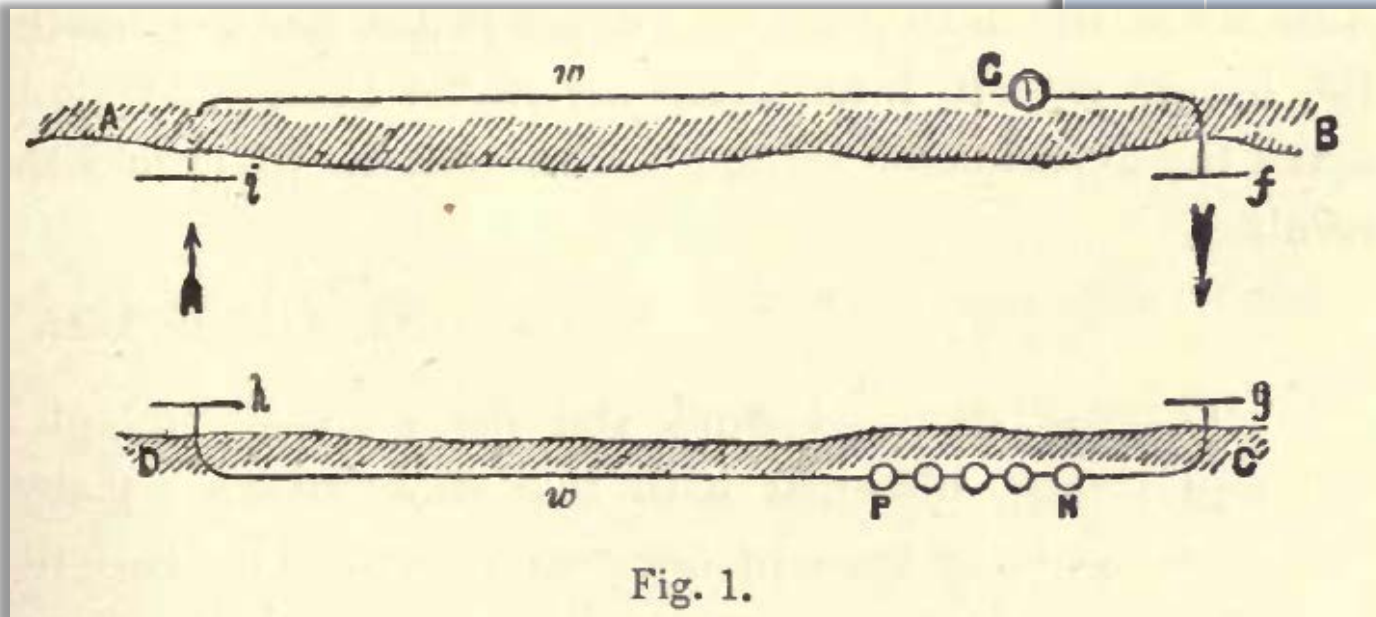
伝導型無線電信: 川や海などの水域等で電線を展張できない環境での「無線」通信

年	研究者	内容
1745 頃	ムッシュェンブロク	ポメラニアのユルゲン・フォン・クライスト、およびライデンのピーター・ヴァン・ムッシュェンブロクが互いに独立に電荷を蓄える装置(コンデンサ)を発明、後者の居所から ライデン壘 と呼称
1795	サルバ	<p>スペイン・バルセロナの科学アカデミーで“<i>On the Application of Electricity to Telegraphy</i>”と題して講演。最初は1本の被覆電線と海水をリターンパス(アース)の代わりに使う方法だったが、最終的に電線を使わないアイデアを提案。</p> <p>コンデンサ(ライデン壘)に静電気を充電して一方の電極を海に浸しているとき、他方の電極を海に浸すとスパークが飛ぶ。遠く離れた二つの地点をそれぞれ正あるいは負に帯電させ(コンデンサのように)、そこから海に電極を入れる。両方の地点の電位が正と負であれば電極を海に入れたときに火花が飛ぶ。同じ電位であれば飛ばない。</p> <p>火花が飛ぶか飛ばないかを知ることで、他方の地点の状態がわかり、情報伝送が可能。</p>
1836	スタインハイル	ガウスの提案に従い、被覆した電信線の代わりに鉄道レールを利用しようとニュルンベルグとフルトの間で実験を行い、結果的に失敗。この失敗の分析から、大地の導電性の良いことに気づき、 <u>リターンパスとしてのアースの重要性</u> を確信。

引用: "A History of Wireless Telegraphy 1838-1899 including some Bare-wire Proposals for Subaqueous Telegraphs," J. J. Fahie (1899) pp. 1--3

ヘルツ以前の「無線」通信 2

伝導型無線電信: 川や海などの水域等で電線を展張できない環境での「無線」通信



年	研究者	内容
1842	モーリス	<p>合衆国財務長官宛の手紙(1844年12月23日付)で、物理学協会の求めに応じて市民向けに1842年秋に行ったデモの結果を報告。</p> <p>ニューヨーク・ガバナーズ島とキャッスル・ガーデンの間約1マイルの間で被覆線を水中に沈めて実験を行おうとしたが、電線が船の碇に引きずられて断線し失敗。</p> <p>同年12月16日、ワシントンのシティーキャナル(幅80フィート)で銅板を水に沈めた実験に成功。</p> <p>川を挟んだ2か所で銅板の電極 f, g と h, l を対向させ、N~Pの電池を g と h に接続すると、f と l の間に接続した検流計に電流が流れた。</p>

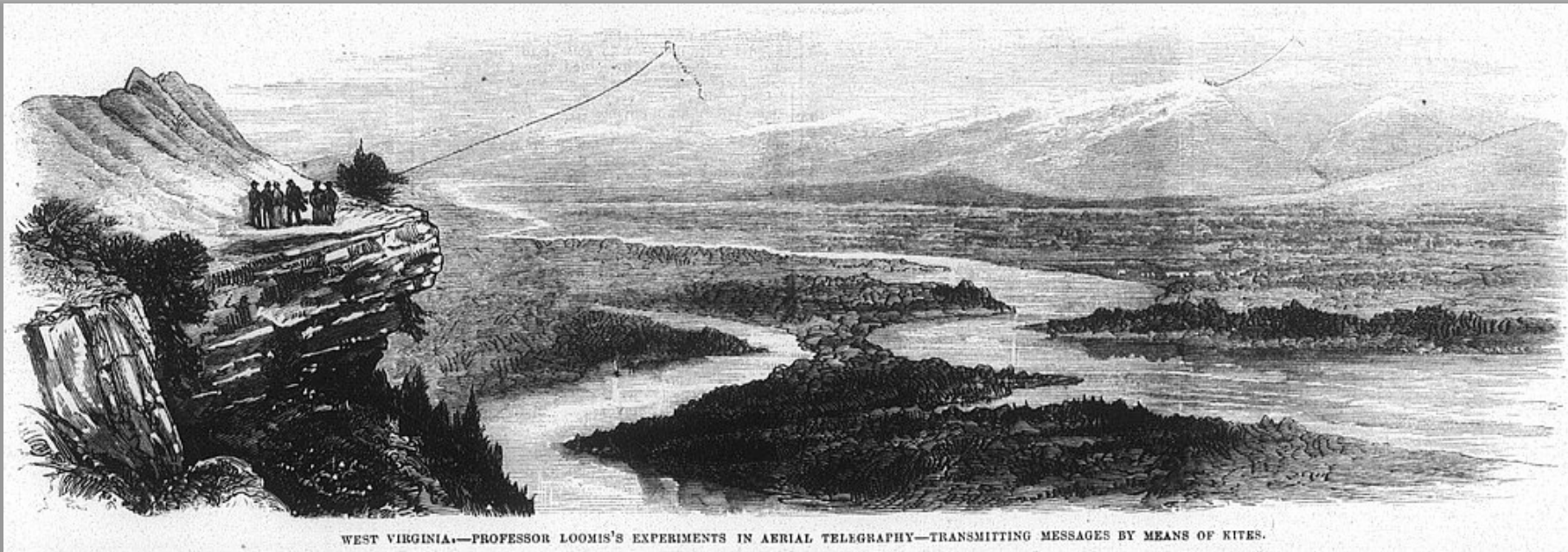
図引用: "A History of Wireless Telegraphy 1838-1899

including some Bare-wire Proposals for Subaqueous Telegraphs," J. J. Fahie (1899) pp. 10-13

ヘルツ以前の「無線」通信 3

伝導型無線電信: 川や海などの水域等で電線を展張できない環境での「無線」通信

年	研究者	内容
1866	ルーミス	ウエストバージニア州ブルーリッジ山系の約14ないし18マイル離れた二つの高山で、それぞれ銅の細線を仕込んだひもで凧を揚げ、一方の山では銅線から検流計を介してアースに接続しておき、他方の山では銅線とアースとの間を電鍵でオンオフした。 凧の高さが同じ場合 、一方の電鍵のオンオフに応じて他方の検流計が反応したという。
1872	ルーミス	6月30日付US特許129,971、“Improvement of Telegraphy” ルーミスの特許取得を記念して5月30日が Loomis Day として祝われている。



ルーミスは、上層大気にくつつかの階層があって、同じ高さだと導電性があると考えた。

凧までの銅線がアンテナとして働くことから、**長さが同じなら同じ波長に共振**していたと解釈する人も。

垂直アンテナとアースを使用した史上初めての例として称える人がアメリカに多い。

図の引用: https://itotd.com/files/2018/05/1877_Loomis_wireless_telegraph_illustration.jpg

Mahlon Loomis invented Radio (?)

Who is the "Father" of Wireless?

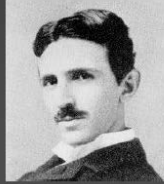
■ Marconi?

- 1896: patent
- 1897: 20 miles
- 1899: English channel
- 1901: Atlantic Ocean



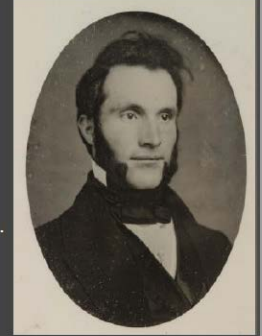
■ Tesla?

- 1891: Tesla coil



Mahlon Loomis

- Born July 20, 1826.
 - Oppenheim, NY.
 - 4th of 9 children.
 - Father was professor and founder of the American Ephemeris and National Almanac.
- Moved to Springvale, VA as boy.
- His oldest brother George was a city official in Parkersburg, then moved to Cranberry Summit.
 - Cranberry Summit was renamed Terra Alta, WV, in 1885 by George's daughter Carrie Loomis Schoeber.



1864年2月20日付のノート:

私は何年にもわたって、電線なしに大洋を超えて、また地球上のある場所から別の場所まで電線を使わずに、電気通信が行われるプロセスを研究しようと試みてきた。

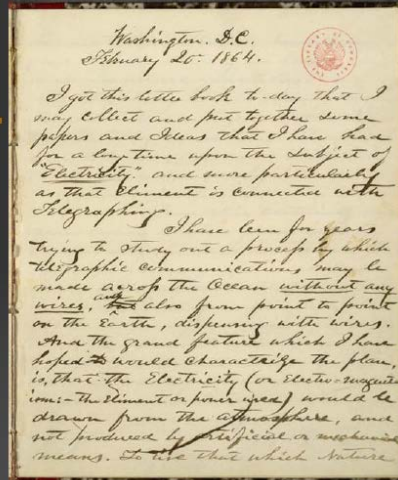
出典: "Did a West Virginian invent Radio?" Henry W. Gould.
<https://math.wvu.edu/~hgould/LOOMIS.PDF>

The Idea

■ Loomis' Journal

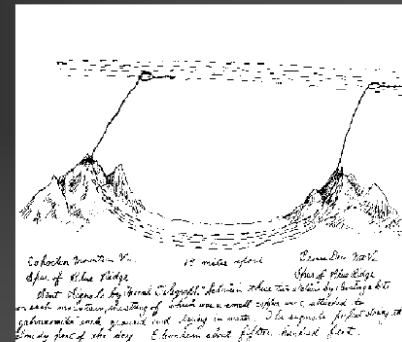
- In Library of Congress
- Dated Feb. 20, 1864

I have been for years trying to study out a process by which telegraphic communications may be made across the Ocean without any wires, and also from point to point on the Earth, dispensing with wires.



The Experiment

- October 1866.
 - Some sources say 1868.
- Two kites on two peaks in the Blue Ridge Mountains in Loudon County, VA.
 - Copper wire for kite string.
 - Peaks were 14 miles apart.
- Witnessed by Senator Pomeroy (KS) and Representative Bingham (OH).



ヘルツ以前の「無線」通信 4

誘導型無線電信: 電気的あるいは磁氣的な誘導を利用した「無線」通信

年	研究者	内容
1820	エルステッド	電流の磁気作用を発見
1826	サヴァリ	<p>電線を直線的に這わせ、それに沿って平行かつ等間隔に針を並べる。電線でライデン壘を短絡して放電させると、電線からの距離に応じて針の磁化方向が周期的に変化することに気付く。</p> <p>次に、針をガラスボビン中に入れ(下図)、上から電線を巻いてライデン壘を放電させた。この場合、電線と各針の距離は同じだが、針の磁化の方向や大きさは放電の大きさや針の長さや太さの比で決まる。また、特定のサイズ・長さの電線で生成できる磁化には最大の値がある(飽和)こと、針の近くに金属を置くと、その金属の大きさや針からの距離に応じて、針の磁化の大きさや方向に大きな影響を及ぼすことを見出した。</p> <p>これらのことから、ライデン壘の放電で流れる電流には、(電池から供給される直流電流とは異なる) 振動的な性質があることを示唆した。</p>



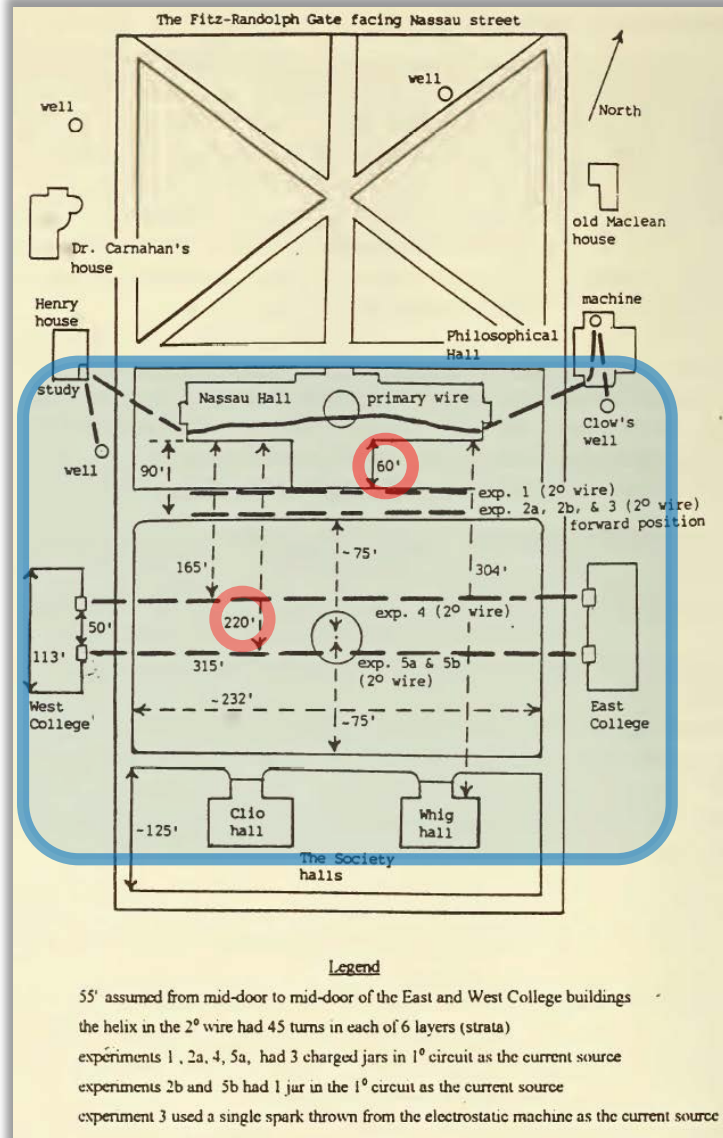
This is a picture of one of the needles that Savary probably used for his experiments with the helix. A very fine needle is wrapped around by a conducting wire, and its polarity is checked using a compass. In this picture, the needle is enclosed in a glass tube for insulation.

年	研究者	内容
1842	ヘンリー	サヴァリの結果に示唆を得て種々の条件で実験を行い、ライデン壘の放電時の電気の動きによって電線から周囲の環境へ一連の 振動が放射 されると結論した。

上の表の文と図の引用: <http://commons.princeton.edu/motorcycledesign/joseph-henry-project/oscillatory-discharge/experiments/>

ヘンリーの実験配置の復元

誘導型無線電信: 電氣的あるいは磁氣的な誘導を利用した「無線」通信

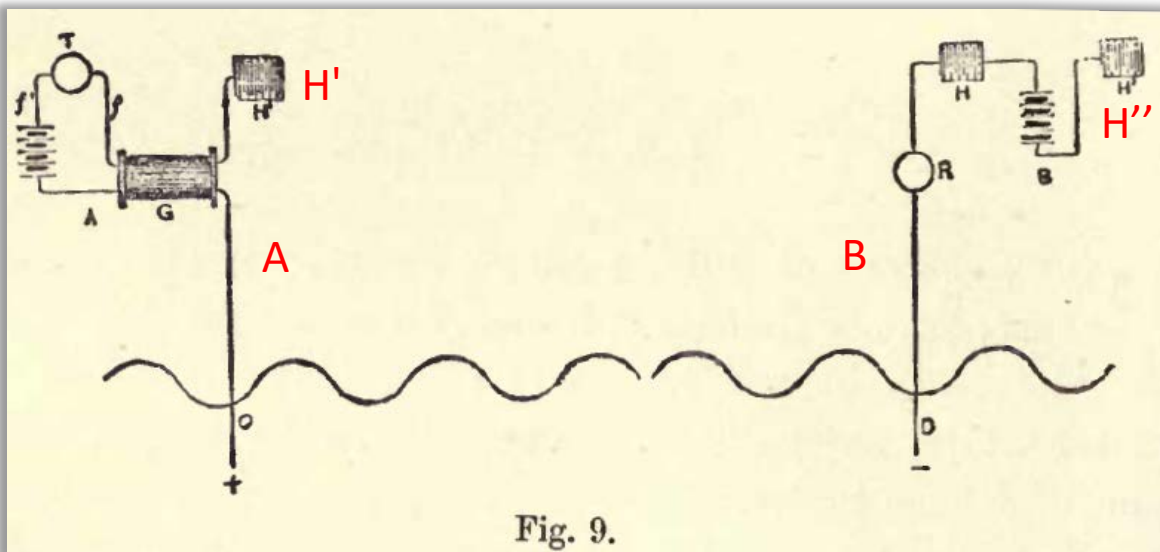


年	研究者	内容
1842	ヘンリー	<p>ニュージャージーカレッジ(現プリンストン大学)ナッソーホールの裏キャンパスにて、電氣的な一連の実験を行った。それは、1次コイルと2次コイルを(60~220フィート)離して配置し、1次コイルに(ライデン壺の)放電スパーク電流を流し、2次コイルの傍に置いた針を磁化させようとするものだった(この時の実験結果などの報告は1865年1月のスミソニアンビルの大失火で焼失してしまった)。</p> <p>ここで論文を引用したグリックマンは、1992年の論文でヘンリーが行った実験の配置(左)を復元し、約350kHzの電磁波が放射されたはずだと推算している。</p>
1894 ~ 1897	ラザフォード	<p>論文"<i>Magnetization of Iron by High-frequency Discharges</i>" および論文"<i>A Magnetic Detector of Electrical Waves and some of its Applications</i>"にてヘンリーの業績を紹介</p> <p>*この記事が後にマルコーニに「磁器検波器(通称マギー)」の開発を促したと言われている。</p>

図引用: "Joseph Henry's 1842 and 1843 Out-of-Doors Electrical Transmission Signal Experiments," Albert Gerard Gluckman, Journal of the Washington Academy of Sciences, Vol. 82, No 3 (September 1992) p.116

ヘルツ以前の「無線」通信 5

誘導型無線電信: 電気的あるいは磁氣的な誘導を利用した「無線」通信



図のA(左側)はタフツカレッジ、B(右側)はドルベアの自宅。
A(送信側)の誘導コイルの1次側には電池(f)とマイクロフォン(T)が接続され、2次側の一端はアース(C)に、他端はコンデンサ(H')に接続されている。

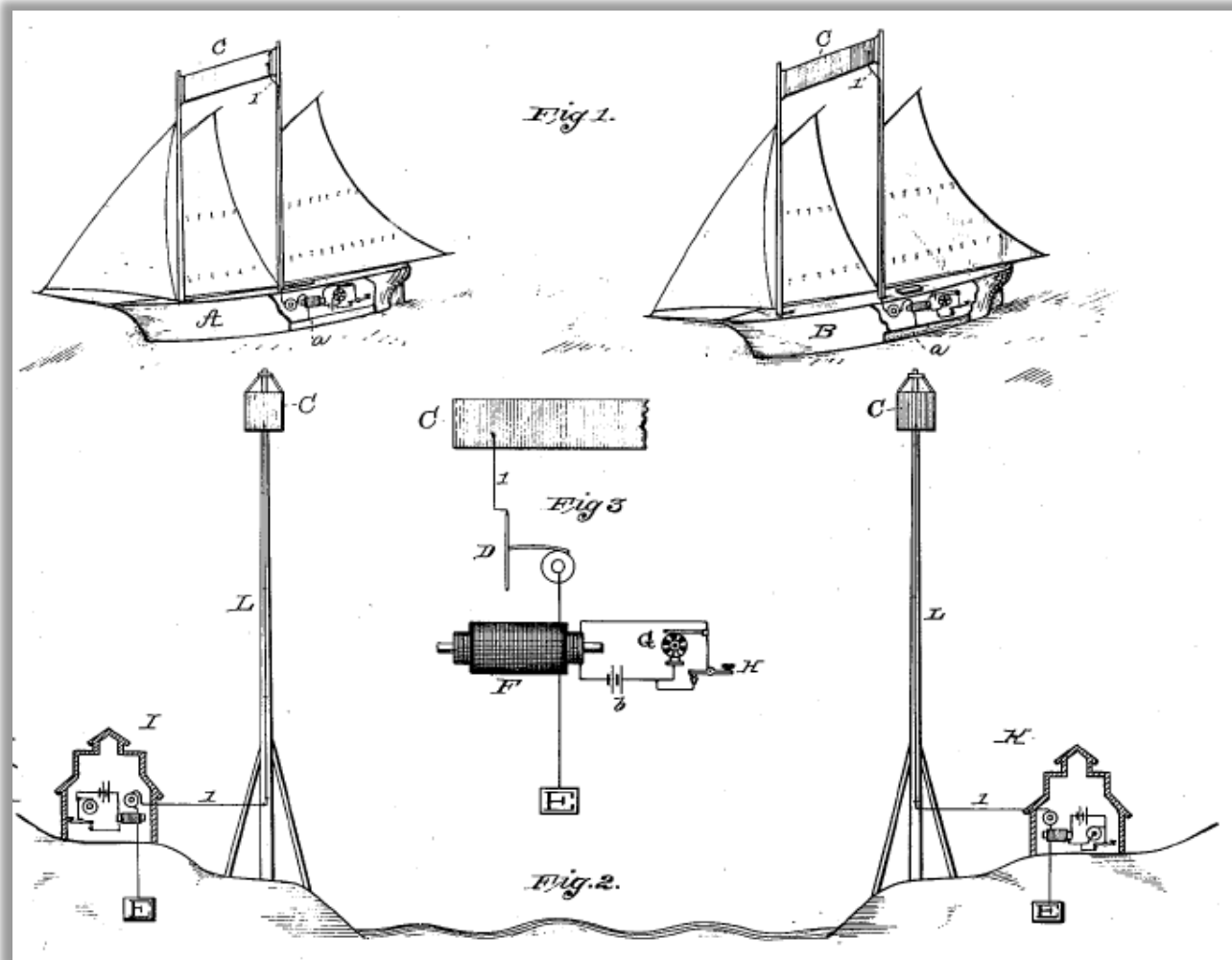
自宅B(受信側)ではアース(D)、受話器(R)、コンデンサ(H)および電池(B)を介してコンデンサ(H'')が接続されている。H'とH''の(ここには書かれていない)一方の端子に適切に電位を与えると、マイクロフォン(T)で話した声が受話器(R)で聴取できる。

年	研究者	内容
1881	ドルベア	無線電話の開発に携わり、アメリカで特許 239,742 “Apparatus for Transmitting Sound by Electricity” を取得。
1882	ドルベア	左の図に示す方式で“Mode of Electric Communication”と題して特許を申請し、1866年に特許を取得(US 350,299)。ただし、一方のアースの電位が他方の受信側のアースの電位に影響して通信できると説明。 その後、自動的に断続する誘導コイルの1次側にモースキーを接続、2次側の一端をアースし、他端から電線で金箔製の扉に接続して吊り上げると感度が向上すると述べている。 特許US 350,299 はマルコーニ社がアメリカで事業展開するために買い取った。

図引用: “A History of Wireless Telegraphy 1838-1899 including some Bare-wire Proposals for Subaqueous Telegraphs,” J. J. Fahie (1899) p.100

ヘルツ以前の「無線」通信 6

誘導型無線電信: 電氣的あるいは磁氣的な誘導を利用した「無線」通信

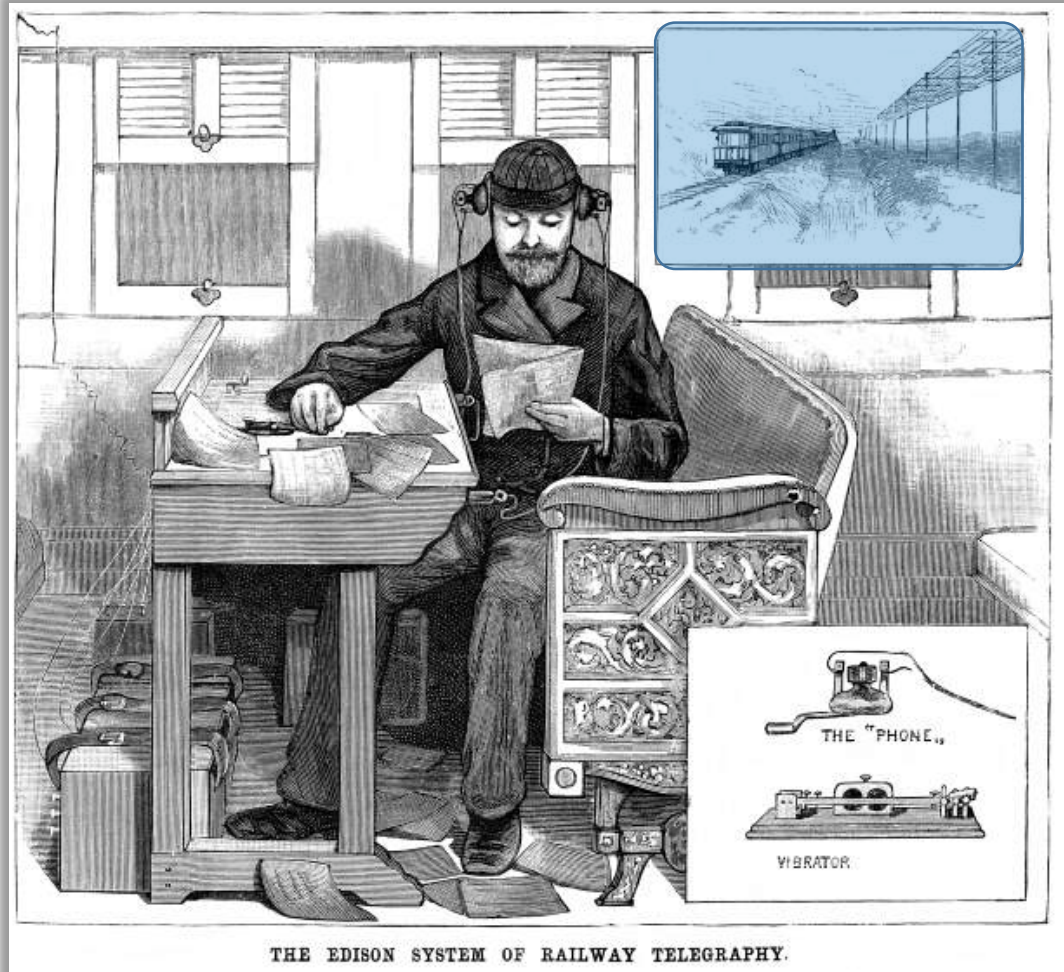


年	研究者	内容
1885	エジソン	<p>“Means for transmitting signals electrically” と題して特許を申請し、1891年に特許 US 465,971を取得。</p> <p>船舶と地上(燈台など)、あるいは船舶同士の通信を目的とする方式。</p> <p>船のマストにアンテナを建て、地上局はタワーを建ててアンテナを懸垂する。相手が水平線を超えて見えなくなる距離での通信の場合は風船でアンテナを上展張する。</p> <p>エジソンは金属板(C)を介した静電誘導による通信を考えていて、ヘルツが1888年に電磁波の存在を実験的に確認したため、この特許が使われることはなかった。</p>

図引用: US Patent 465,971 "Means for transmitting signals electrically" December 29, 1891 より

ヘルツ以前の「無線」通信 7

誘導型無線電信: 電氣的あるいは磁氣的な誘導を利用した「無線」通信



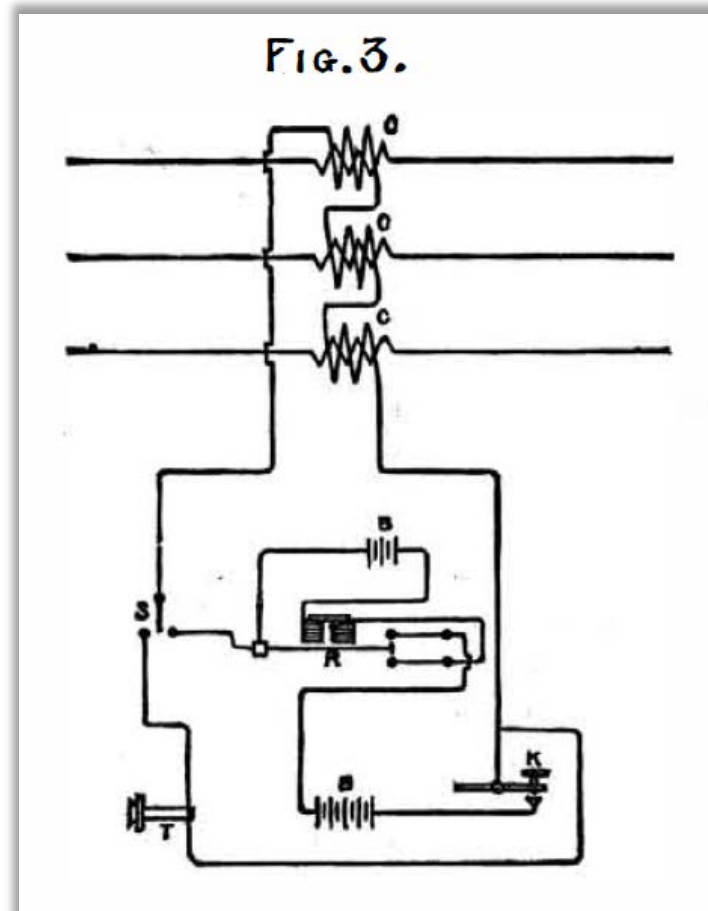
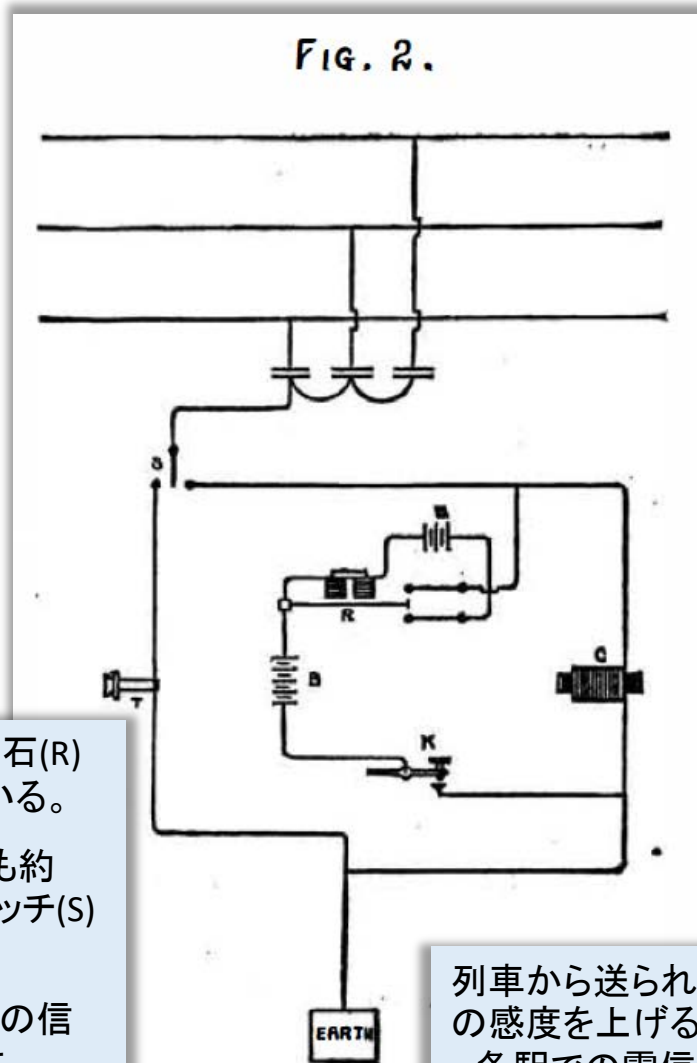
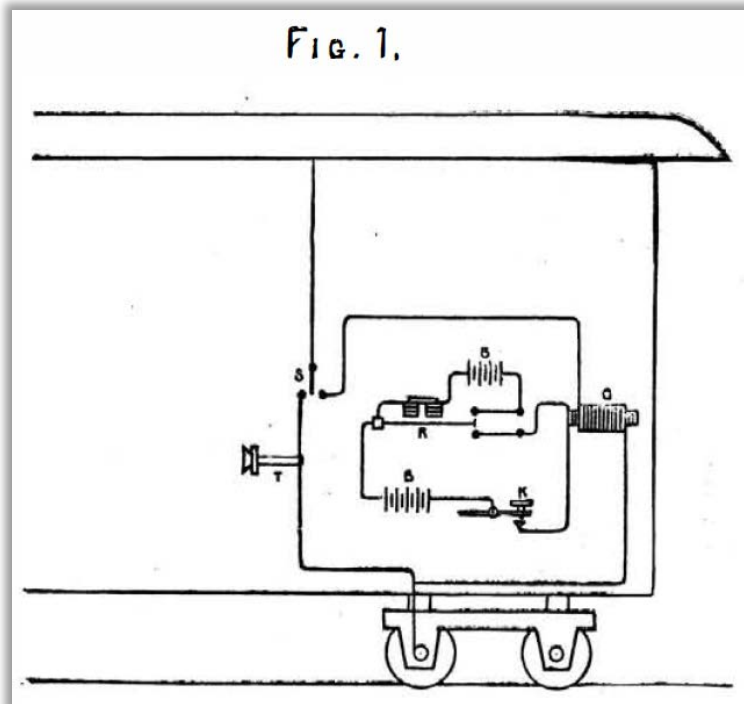
THE EDISON SYSTEM OF RAILWAY TELEGRAPHY.

送信すべきメッセージの電気信号はブリキの屋根に印加され、線路の脇に敷設された電信線と静電的に結合して送られる。

年	研究者	内容
1881	スミス	<p>線路に沿って電柱を建て、町を結ぶ電信システムがアメリカで発達していた。一方、列車の乗客向けに、特別な電線を使用する通信システムをフェルプスが開発していたが、スミスは従来の電信線を活用できる“Car Telegraph”を開発し特許を得た(US 247,127)。</p> <p>スミスのシステムは動作が不安定で、ギリランドとエジソンが改良に乗り出した。1885年、エジソンは特許を申請するが、フェルプスとともに聴聞会に呼ばれる。そうこうするうちに、ウッドも特許申請に加わり、1887年、最終的にウッドの申請が認められた(“Telephone System and Apparatus” US371,241)。</p> <p>その理由は、スミスや改良版のエジソンのシステムは静電誘導型であるのに対し、ウッドのシステムは新たな電磁気型であると判定されたためだという。</p>

Edison Railway Telegraph

誘導型無線電信：電氣的あるいは磁氣的な誘導を利用した「無線」通信



列車内の机上にはモースキー(K)、ヘッドフォン(T)、電磁石(R)とバイブレータ、誘導コイル(C)とバッテリー(B)が備わっている。

キーを押すと誘導コイルに電流が流れ、バイブレータも約500Hzで振動する。2次側nに生じた500Hzの高圧はスイッチ(S)を介してブリキの屋根に接続される。

受信時はスイッチ(S)をヘッドフォン側に倒し、屋根からの信号をヘッドフォンを介して聴取し、車輪からアースに返す。

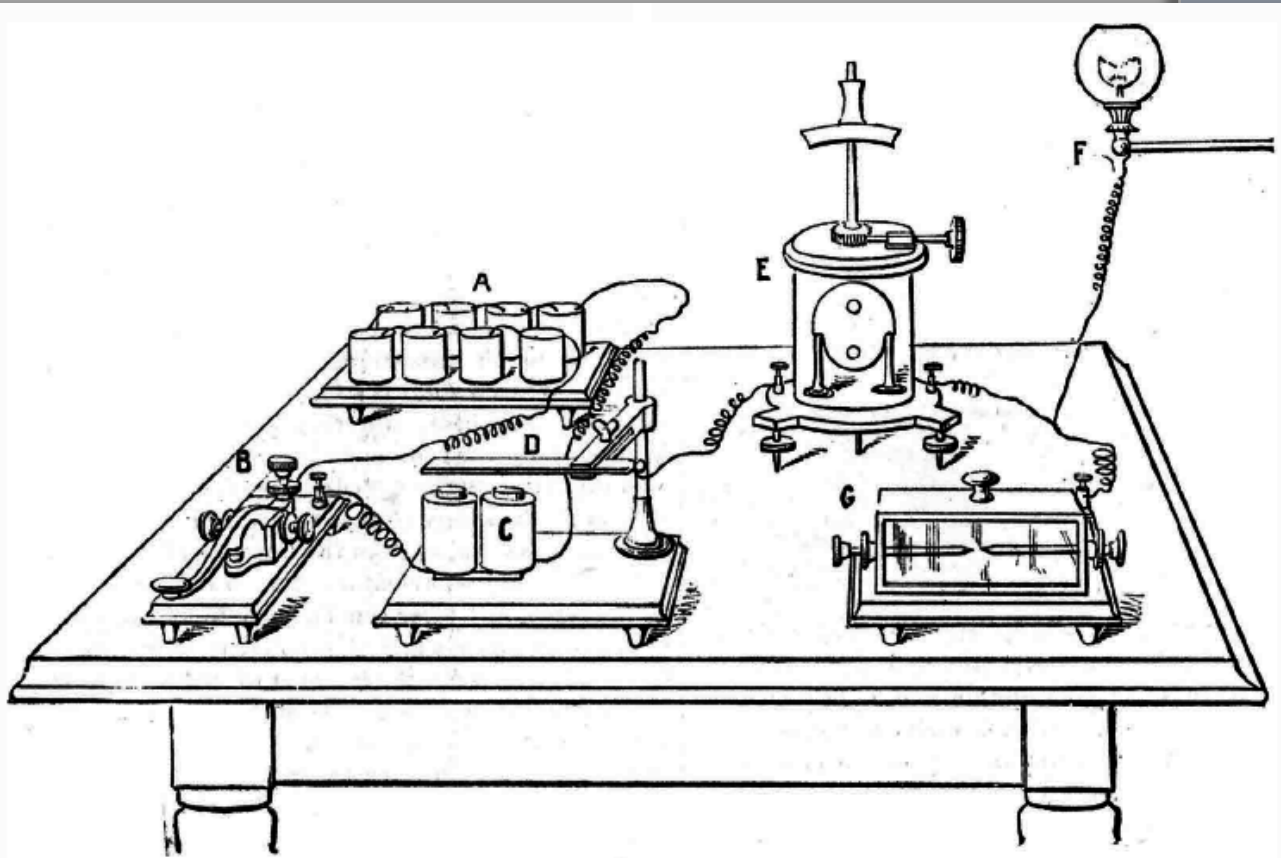
列車から送られた信号はすべての電信線に誘導されるので、駅での感度を上げるには多くの電信線から信号を取り出すのが良い。各駅での電信線との結合は静電型(左)と誘導型(右)がある。

ヘルツ以前の「無線」通信 8

電磁気型無線電信:

年	研究者	内容
---	-----	----

1875	エジソン	<p>この年、エジソンは不思議な現象に気付いた。電信用の回路でスパークが発生すると、離れた位置にある二つの導体の間でスパークが発生するのである。</p> <p>バッテリーAからの電流は電鍵Bで断続され、リレーCが鉄片Dを引き寄せる。この時にスパークが発生する。Dの一端からは、ガルバノメータEを介してガスパイプFで接地されるが、ガルバノメータは反応しなかった。その代わりに、一端だけが接地されているスパーク端子Gではわずかなスパークが観測された。</p> <p>エジソンはこの現象から、まだ知られていない新しい物理的な力が存在していると考え、これを etheric forth と名付けた。</p>
------	------	--



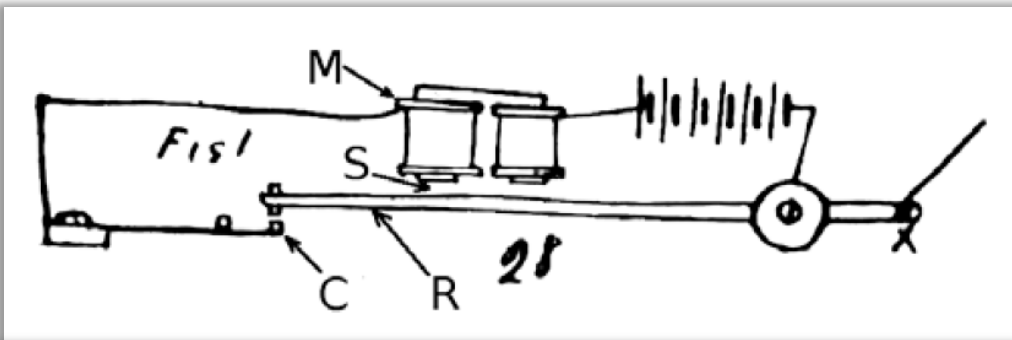
MR. EDISON'S APPARATUS, EXHIBITING THE NEW PHASE OF ELECTRIC FORCE.—Fig. 2.

図引用: "The new phase of electric force," Scientific American, Vol.33, No.26, Dec. 25 (1875) p.401

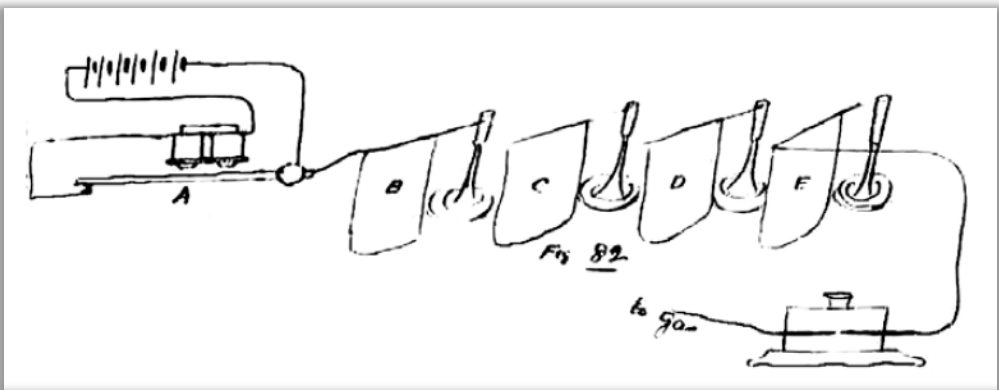
同じ年、エリフ・トムソンとエドウィン・ヒューストンが、スパークは高周波で振動する電流に他ならず、直流計器であるガルバノメータでは検出されないことを示した。

エジソンは他の研究を優先していたので、しばらくetheric forth研究を行わず、結局、「無線電信」の確立に至らなかった。

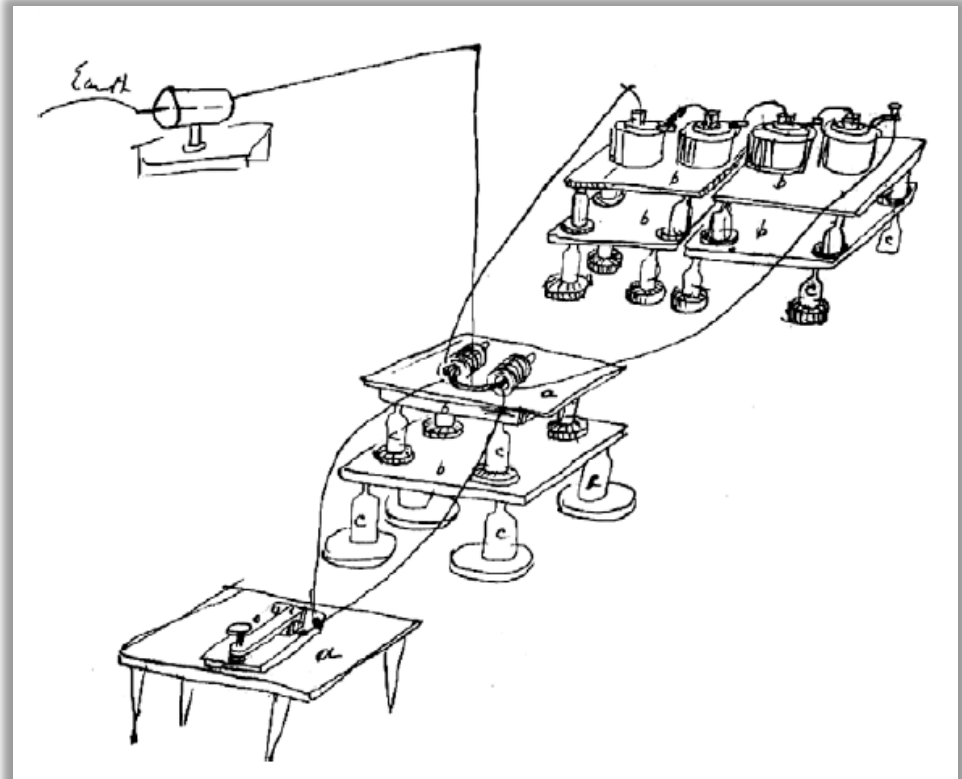
Edison's etheric force



本来は電流が流れないはずの箇所'S'で火花が発生しているのに気づく。子細に調べると、振動棒Rの一部や、Xに接続した電線の末端からも火花が出た。
 驚いたことに、Xからの電線をガス管に繋げてガスを噴き出しておき、金属をガスに触れさせると火花が出た。

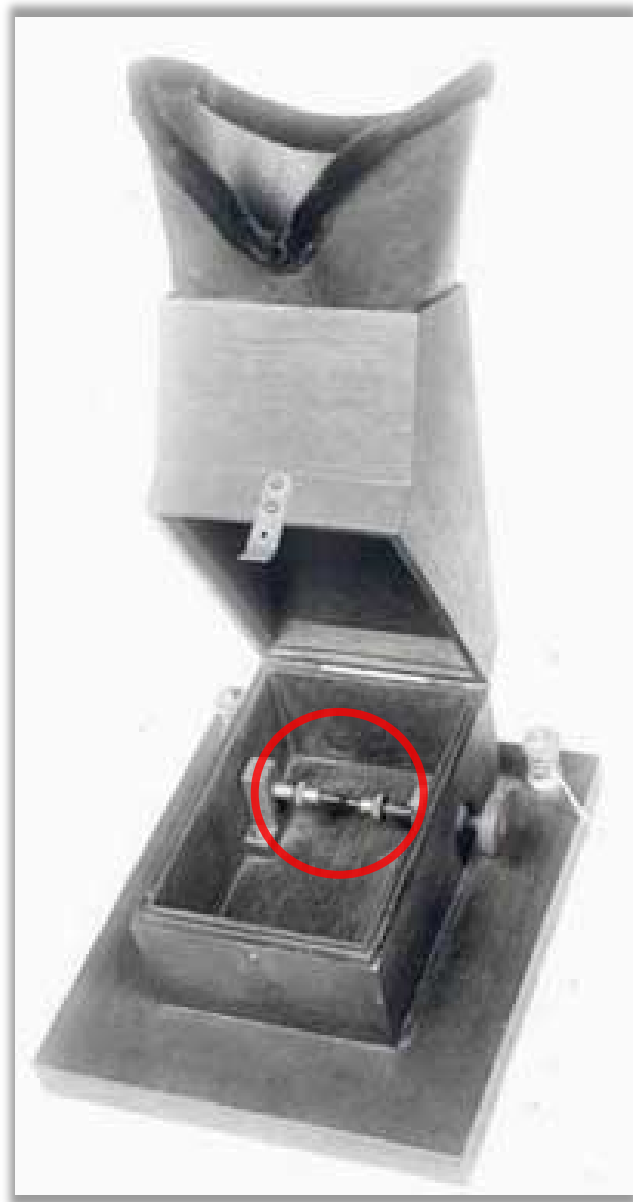


Xからスズ箔Bに接続。Bは絶縁棒で支持されている。C, D, Eも同様。Eからは内部にスパークギャップを持つ Etheroscope に接続され火花が観測された。Etheroscope の他の一端はガス管にアースされている。



エジソンのetheric force 発見の報告に対して、当時、ヒューストンとトムソンはエジソンの装置を巧みに組み立てることで火花の発生を止められることを示して批判した。
 エジソンは彼らの行った実験を忠実に再現し、彼らの主張を認め、それ以降の実験を中止してしまった。
 現在では、このエジソンの etheric force が電磁波だったと考えられている。

Edison's etheroscope



Etheric force によるスパークギャップからの火花は弱いので、明るいところで見るとは難しい。そこで、スパークギャップをブラックボックスに入れて上から覗けるようにした。これは覗き窓の付いた上部を持ち上げて、内部を見せたもの。

写真引用 : https://ethw.org/File:Etheric_Force.jpg

電磁波の発見に関連した科学的な業績

年	研究者	内容
1785	クーロン	二つの電荷の間にかかる力が互いの距離の2乗に逆比例
1800	ボルタ	電池の発明。これにより、直流の連続使用が可能となり、実験が容易になった。
1820	エルステッド	電線に電流を流して磁石を近づけると磁針が動く。電気と磁気の相互作用
1820	アンペール	二つの平行に張られた電線に電流を流すと、電流の向きによって引力/反力が生じた。
1831	ファラデー	電場と磁場を着想した。電磁誘導の発見
1855	マクスウェル	ファラデーの観測に関する理論についての第1論文
1861 1862	マクスウェル	4部の論文を発表。ある表面を通過する電束の変化が磁場を作る
1864	マクスウェル	A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field を10月に投稿 翌年に出版される (Philosophical Trans., Vol. 166, pp. 459-512, 1865)
1873	マクスウェル	数学的に解説した代表作 A Treatise on Electricity and Magnetism を出版
1885	ヘビサイド	マクスウェルの20本の式を4つにまとめる
1888	ヘルツ	マクスウェルが予言した 電磁波の存在を実験で確認 したと報告

マクスウェルの方程式

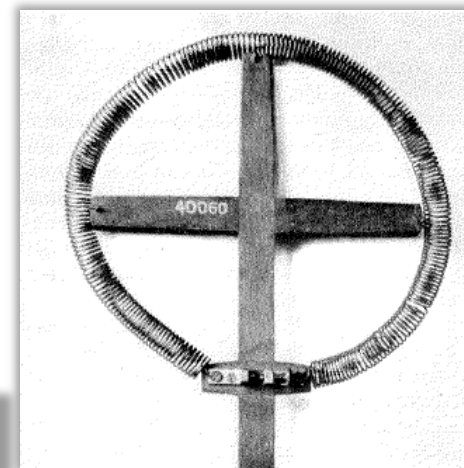
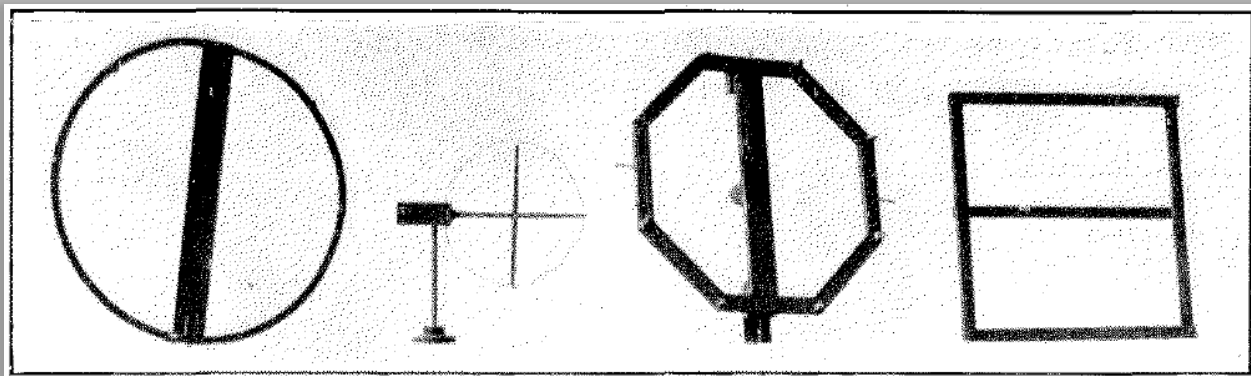
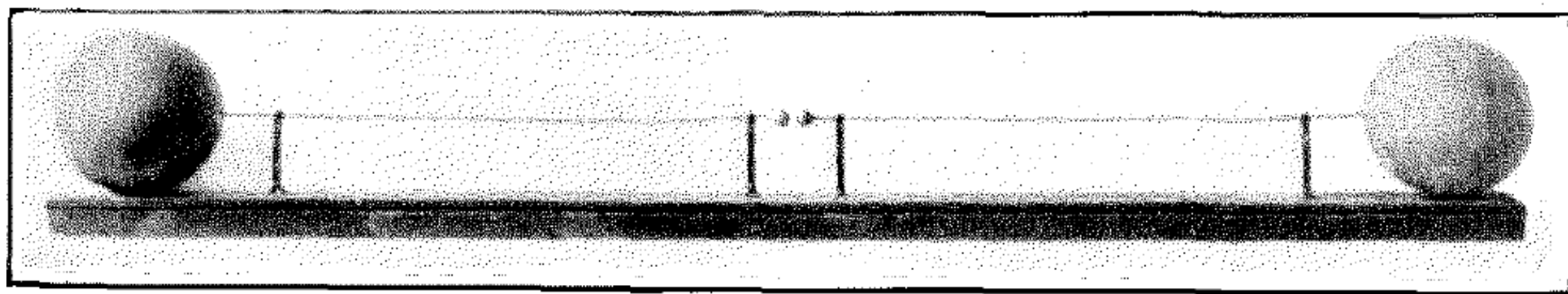
$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1) \quad \text{Gauss' Law}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2) \quad \text{Gauss' Law for magnetism}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3) \quad \text{Faraday's Law}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (4) \quad \text{Ampère-Maxwell Law}$$

ヘルツの初期実験の装置の例



(上)長さ1mの銅線の一端に直径30cmの垂鉛球を付け、他端にスパーク小球を付ける。それを対にしてスパーク間距離を7.5mmにし、インダクションコイルから20,000ボルトを印加した場合、周波数約50MHzの電磁波が放射された。

(左)電磁波検出用の各種ループアンテナ。左から直径ないし一片の大きさ70cm, 35cm, 67cm, 60cm。

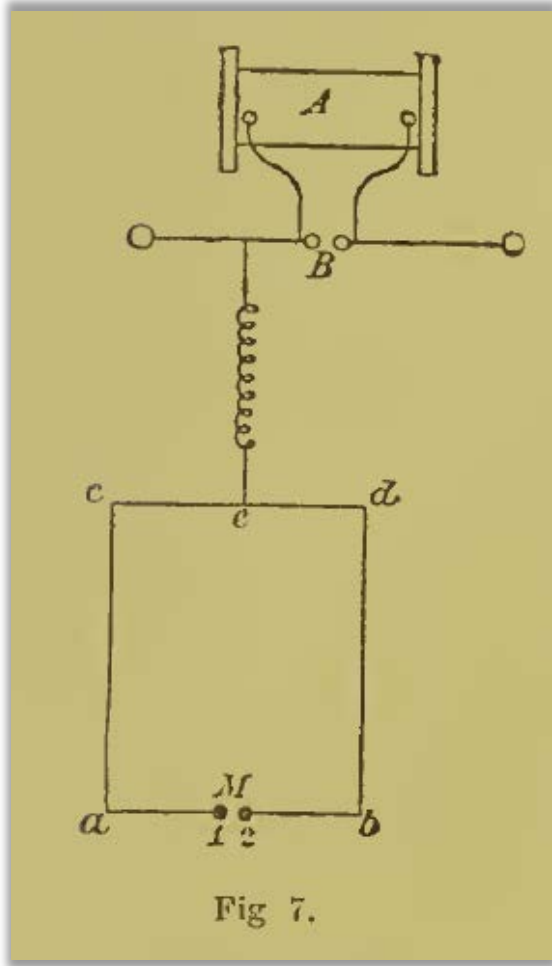
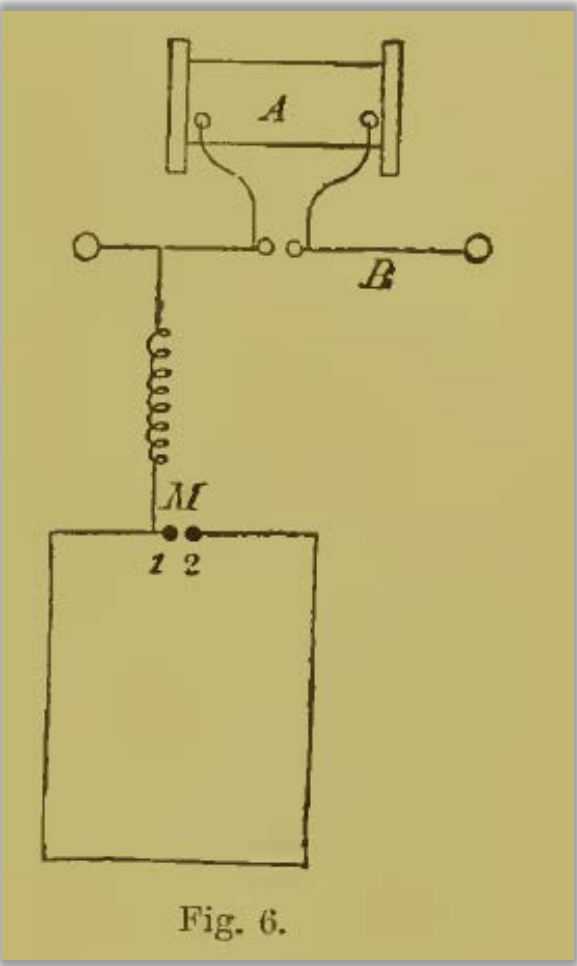
(右)同じく直径21cmの円形ループ。自己誘導を高めるため円周部はスパイラルに巻いてある。

ヘルツの初期実験

誘導コイル(A)の出力にスパークギャップ(B)を設け、アンテナを接続。Fig.6とFig.7の違いは、矩形の回路のどこにマイクロメータ(M)を置いて火花を観測するか、である。

Fig.7では、矩形の回路 a, b, c, d の c と d の中点に送信側のエネルギーが供給され、反対側の a と b の中点に M が置かれている。このとき、M の両端 1 と 2 の間に火花が発生しなかったため、ヘルツは e から M の 1 までと 2 までの電気振動の到達時間が同じで電位差が生じないためだろうと(最初は)考えた。

しかし、例えば M の 1 側に金属導体を付けると火花が発生し、2 の側に導体を付けると火花は飛ばない。また、a から 1 までの電線の一部を切り取ってコイルを挿入すると M に火花が発生し、反対側の b から 2 までの電線の一部を切り取ってコイルを挿入しても火花は飛ばない。



図引用: “Electric Waves being Researches on the propagation of electric action with finite velocity through space” by Dr. Heinrich Hertz, authorized English translation by De. E. Jones, Macmillan and Co. (1893) のp.31 (Fig.6)、p.34 (Fig.7)

ヘルツの初期実験

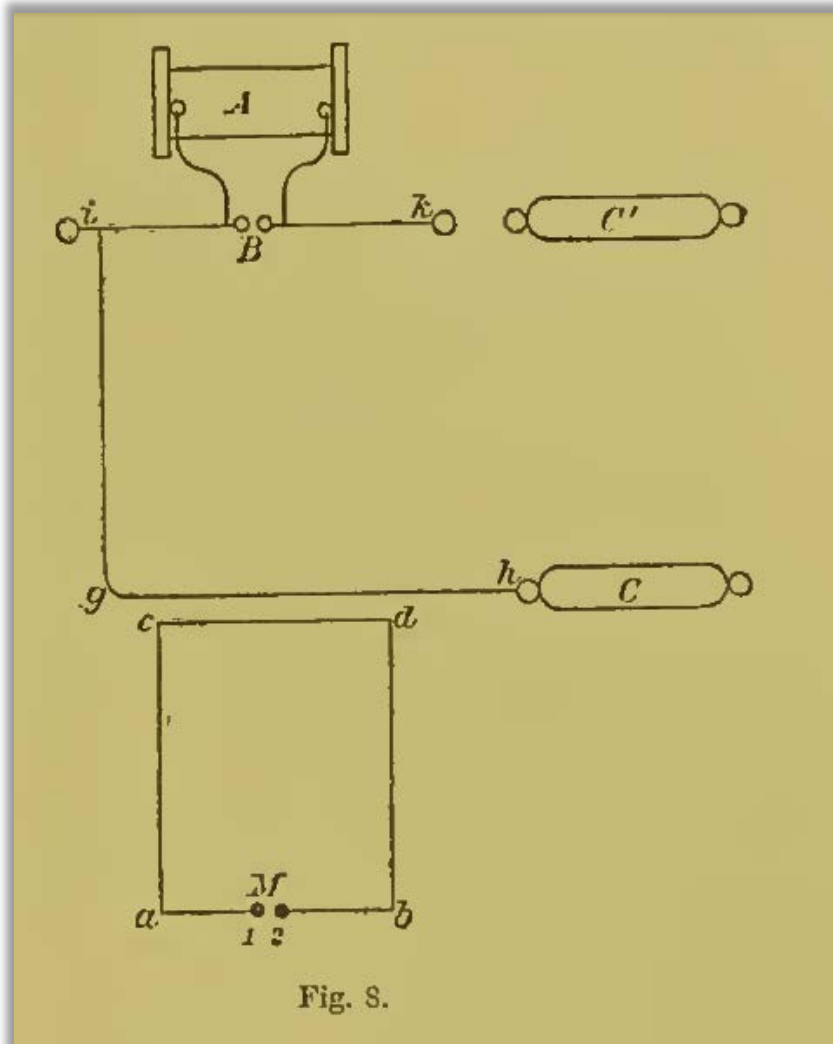


Fig. 8.

ヘルツは、これらの(前シートに示した)実験の後、Bのスパークギャップで発生した電気振動が矩形回路に伝搬したときの共振に原因があると考えて左図の実験を行った。

Bから伸びる導体(アンテナ)の端Iから導線をi-g-hのように伸ばし、矩形回路のcd辺をghに並行に3cm離して置く。Bに火花が飛ぶと、矩形回路のab辺の中央に置かれたマイクロメータMの火花端子1,2からも火花が観測された。

その原因が電磁誘導か静電気力なのかを判断するため、hに導体Cを接続したところ、Mの火花は強くなったが、Cをgに接続した場合にはMの火花は強くならなかった。静電気力が原因であれば、Cをhにつけてもgにつけても同じはずであるから静電気力は原因から棄却される。

次に、アンテナの端部kにCとほぼ同じ大きさの別の導体C'を付けたところ、Mでの火花は更に強くなった。この理由として、hに接続した導体Cからの放電をC'が受けたためだろうと判断した。これらのことから、流れる電流は振動的なふるまいをしていると考えられた。

図引用: “Electric Waves being Researches on the propagation of electric action with finite velocity through space” by Dr. Heinrich Hertz, authorized English translation by De. E. Jones, Macmillan and Co. (1893), p.37 (Fig.8)

ヘルツの初期実験

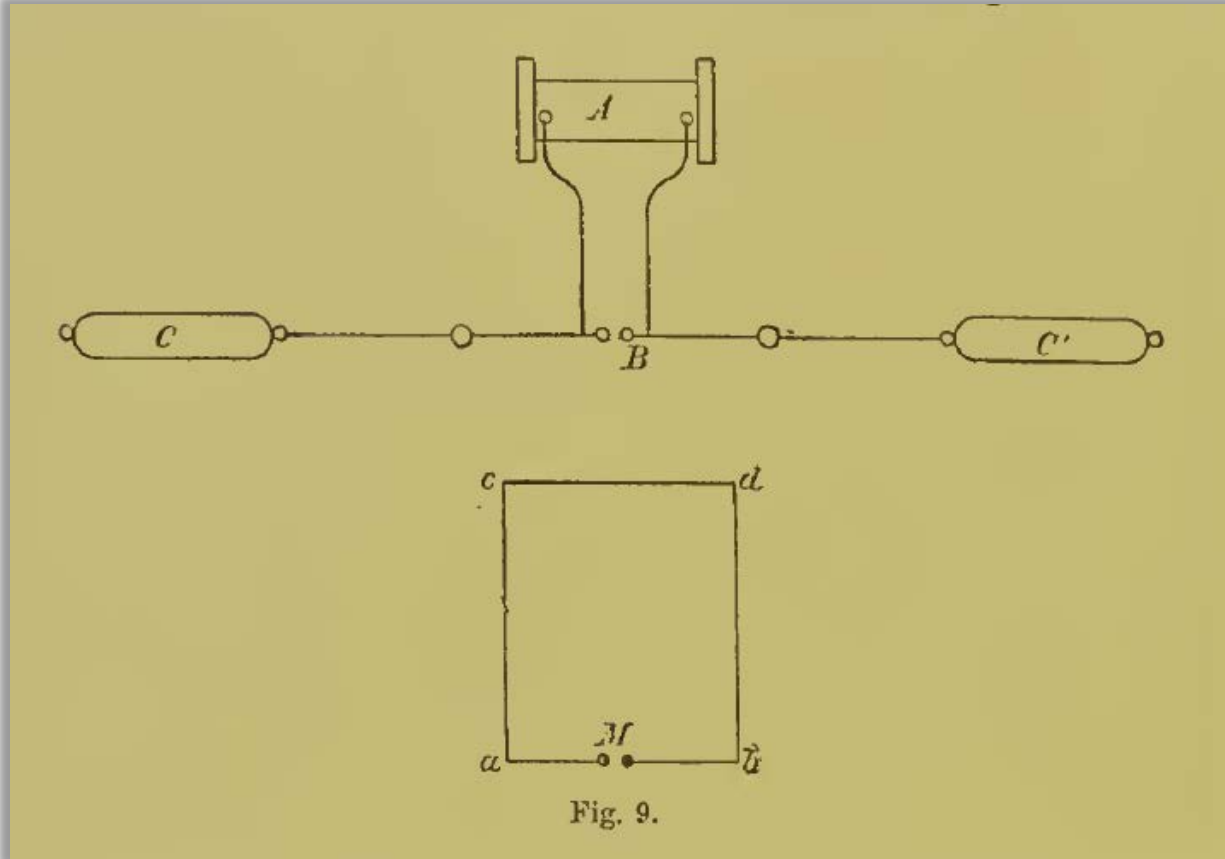


Fig. 9.

流れる電流が振動的ならば、アンテナは単なる直線回路でも良いと考えられ、左の図 9 の実験を行った。アンテナの線の直径は 2mm、両端に付けた金属球の中心間距離は 3m とした。

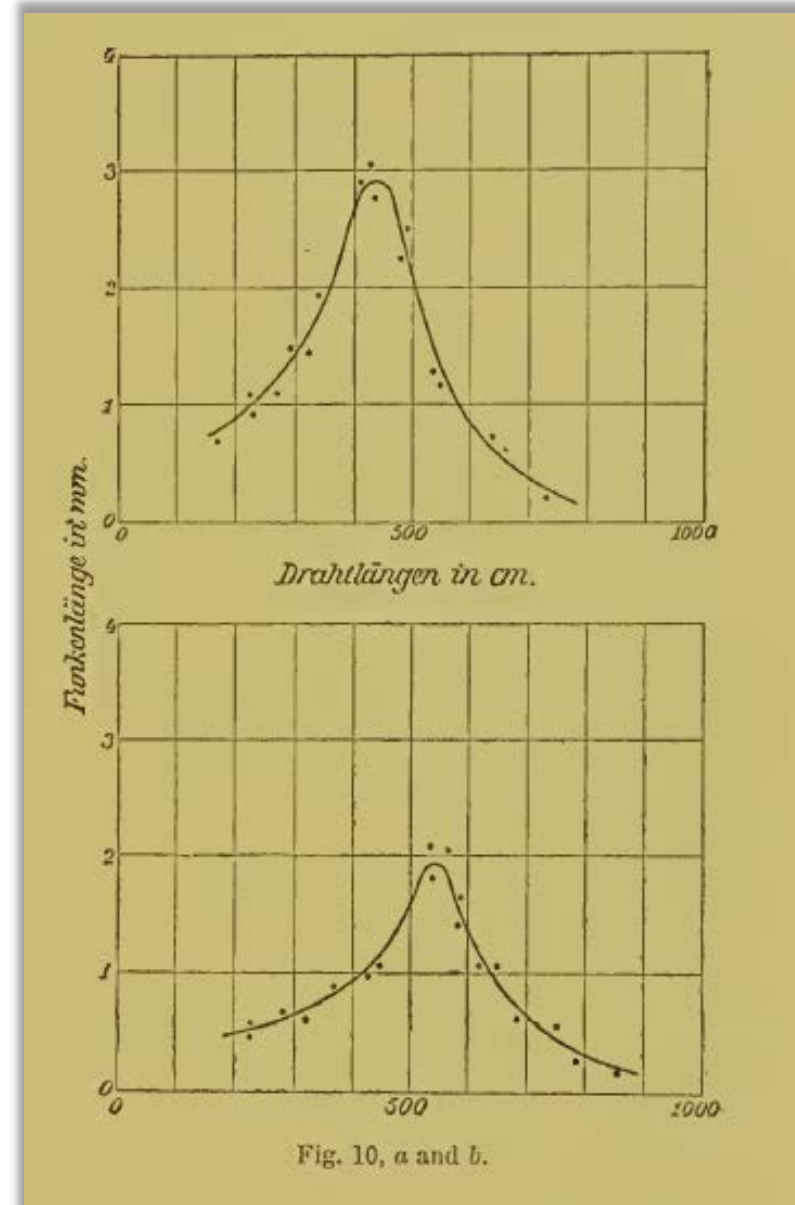
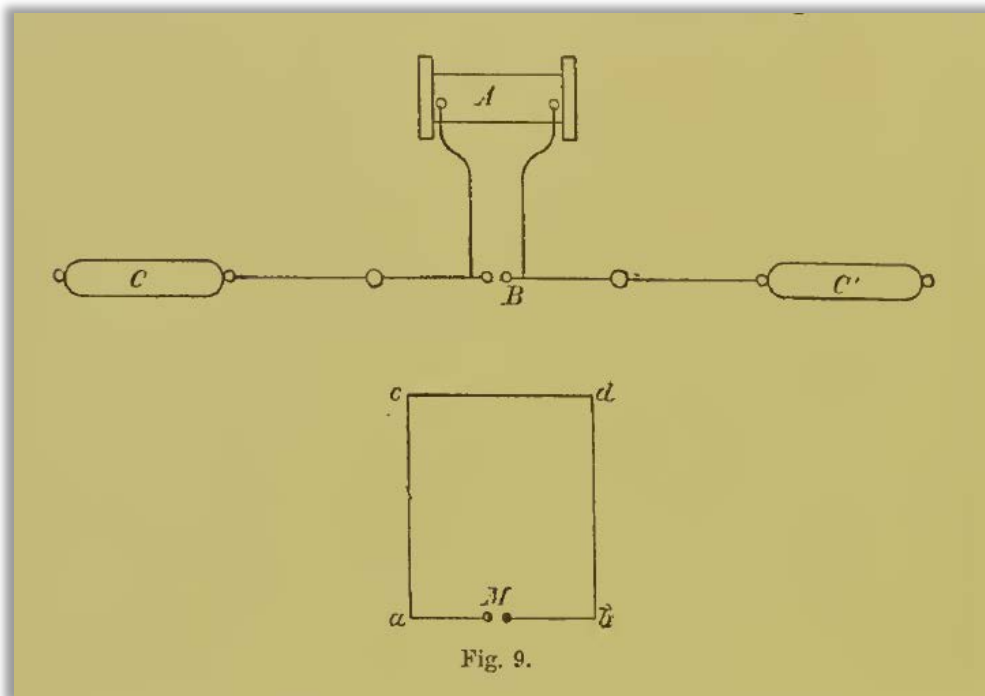
矩形回路の寸法はこれまでと同様で a b 間(c d 間)が 80cm、a c 間(b d 間)が120cm である(全長400cm)。

この実験では、アンテナと矩形回路を 1.5m 離しても、マイクロメータMの両端で火花が観測された。アンテナと矩形回路の間を人間が通過しても火花が観測された。

アンテナの両端の金属球 C, C' に電荷が蓄えられると考えられるが、矩形回路の一部を切り取ってしまうと M からの放電が止んでしまうことから、ここでも静電気力の影響は棄却される。

図引用: “Electric Waves being Researches on the propagation of electric action with finite velocity through space” by Dr. Heinrich Hertz, authorized English translation by De. E. Jones, Macmillan and Co. (1893), p.40 (Fig.9)

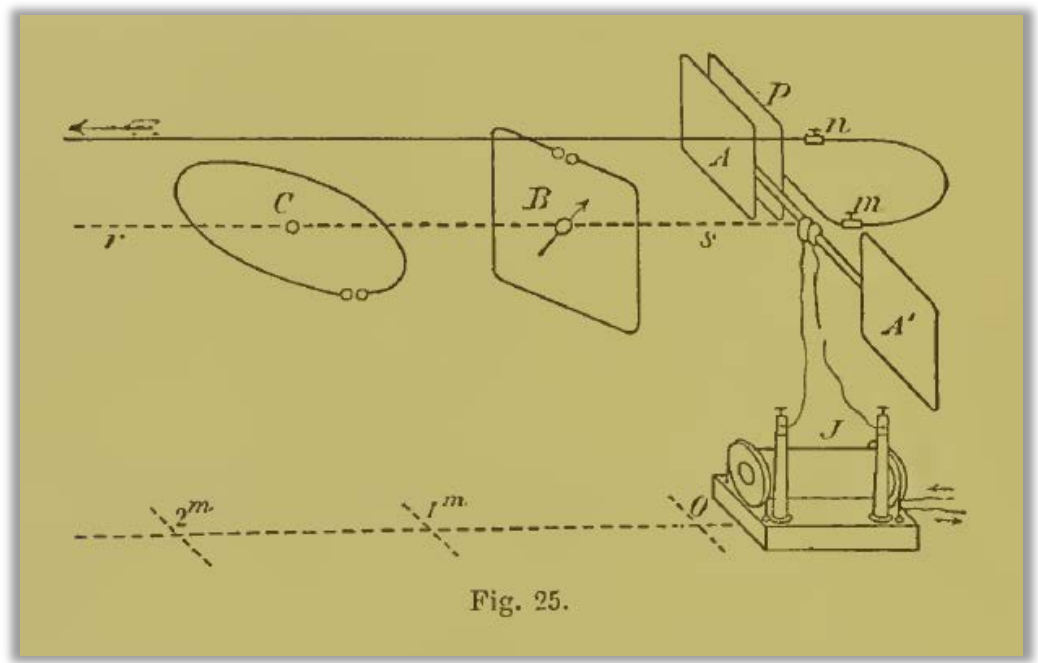
ヘルツの初期(共振)実験



左のFig.9の矩形回路で、a b および c d の長さは(80cm?のまま)一定に保ち、a c および b d の長さを 10cm から 250cm まで変えてマイクロメータ M の間隔をどこまで開けるか、火花が発生する最大距離を調べた。横軸は矩形回路の全長。Fig.10b は a c および b d 間の長さを容易に変えられるように緩くコイル状にした場合。

引用: “*Electric Waves being Researches on the propagation of electric action with finite velocity through space*” by Dr. Heinrich Hertz, authorized English translation by De. E. Jones, Macmillan and Co. (1893), p.40 (Fig.9), p.45 (Fig.10 a and b)

ヘルツの初期（銅線を伝わる波の速度）実験



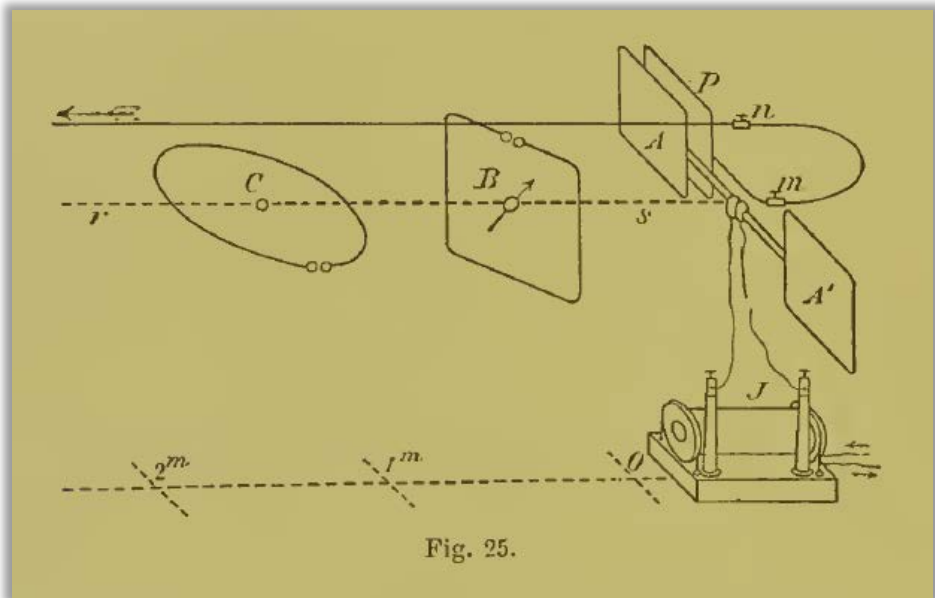
左のFig.25の送信側のアンテナの両端に付けられた導体板 A と A' は真鍮製で一辺は 40cm であり、長さ 60cm の銅線が接続されている（両端の全長 200cm）。床からの高さは 1.5m。スパークギャップから 45cm 離れた位置を基準 0 とし、点線で示す基準線 r s を考える。

A の裏に A と同じサイズの真鍮板 P を置き、そこから直径 1mm の銅線をスパークギャップの後ろの点 m まで伸ばし、長さ 1m で弧を描くようにスパークギャップの上 30cm の点 n まで引き上げ、基準線 r s と平行に室内を通り窓を通して 60m まで伸ばして最後はアースに接続する。

受信側は半径 35cm の円 C や、一辺 60cm の矩形 B など、送信側と共振している。静電容量と自己誘導係数から、振動の周期(の1/2)は $1.4 \times 10^{-8} \text{ s}$ と見積もられた。
 C や B を基準線に沿った n からの銅線に近づけていくと火花が発生し、銅線に沿わせて動かしていくと半波長 **2.8m** ほどの定在波が観測された。これから、銅線を伝わる電気振動の速さが $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ と見積もられた。
 (Fizeau らは銅線で $1.8 \times 10^8 \text{ m/s}$ と報告している)

図引用: “Electric Waves being Researches on the propagation of electric action with finite velocity through space” by Dr. Heinrich Hertz, authorized English translation by De. E. Jones, Macmillan and Co. (1893), p.108 (Fig.25)

ヘルツの初期(空中を伝わる波の速度)実験



スパークによって生じた振動的な電流が空中に放射される速度を知りたい。アンテナ A の裏に置かれた P から m, n を介して電線上に生ずる振動電流の影響と、スパークギャップから空中に放射される電磁波の影響を分けて観測する必要がある。

左の矩形 B は空気を伝わる電磁波を直接受けて火花を飛ばす。B を垂直軸周りに90度回転させておくと、空気を伝わる波の影響は受けない。しかし、A と P の間隔を調整して電線に流れる電流の強さを調整すると、B から火花が出る。B の角度を変えると、電線の影響と直接受ける影響の位相に応じて強弱が現れる。

受信側の円 C に対し、n からの電線を C の面と同じ高さに動かし、A 側あるいは A' 側に移動させる。A, A' が作る磁場の影響は変わらないが、電線による磁場は電線が A 側にあるか A' 側にあるかで逆に影響するから、C と電線の位置関係によって火花が大きく飛んだり消えたりする。C の火花ギャップの位置にはよらなかった。火花が大きくなったり消えたりする現象は、C を基準線に沿って 7.5m 動かすごとに逆転した。こうして 7.5m 進むごとに磁場の波が電線中の波を追い越していくと解釈される。これより、空気中を伝わる波の波長(の 1/2)は $2.8 \times 7.5 / (7.5 - 2.8) = 4.5\text{m}$ と求まる。この距離を伝搬する時間は $1.4 \times 10^{-8}\text{s}$ だったから、空気中を伝わる(電磁波の)速度は $3.2 \times 10^8\text{m/s}$ と計算される。

図引用: “Electric Waves being Researches on the propagation of electric action with finite velocity through space” by Dr. Heinrich Hertz, authorized English translation by De. E. Jones, Macmillan and Co. (1893), p.108 (Fig.25)

ヘルツの実験装置

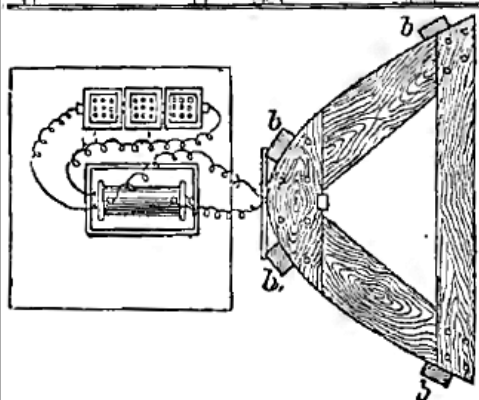
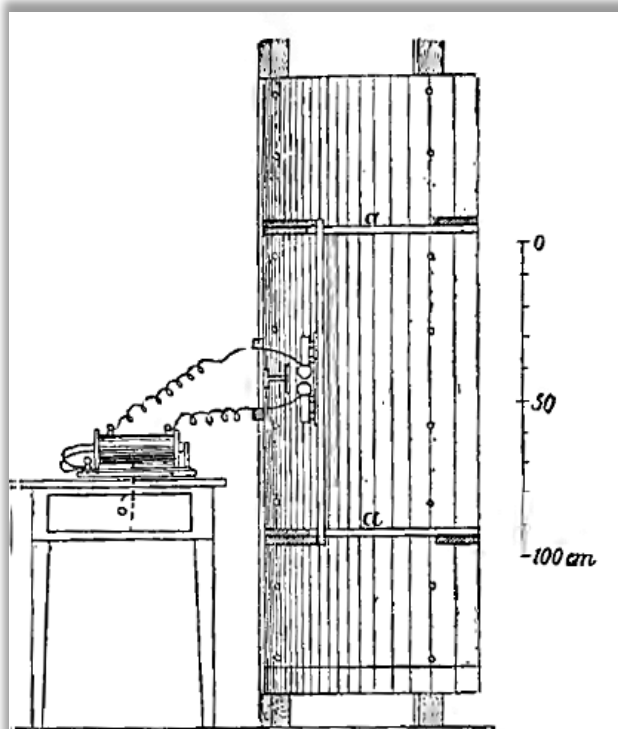


Fig. 35.

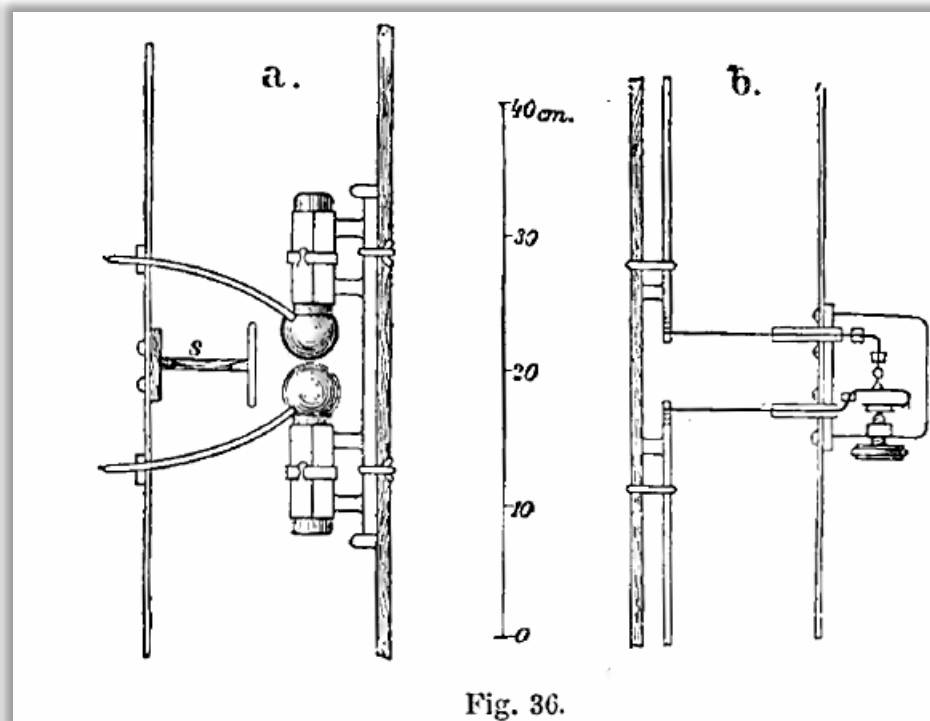
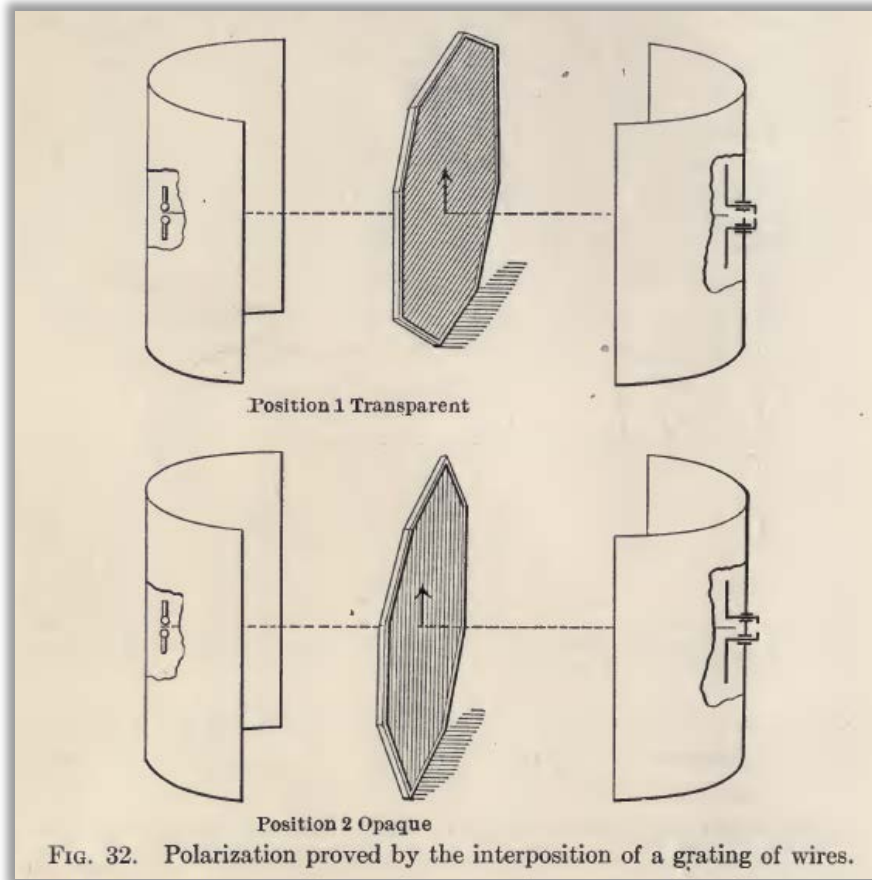


Fig. 36.

パラボラ状の枠に金属シートを張って反射板とし、その焦点の位置に送信側では全長25cmのダイポールの中央にスパーク端子(Fig.36 a)を置き、検出側では約40cmのダイポールを置いて中央にスパーク端子を設け、そのギャップ間隙をマイクロメータで調整できるようにした。周波数は450MHz前後($\lambda \approx 0.66\text{m}$)。

図引用: “Electric Waves being Researches on the propagation of electric action with finite velocity through space” by Dr. Heinrich Hertz, authorized English translation by De. E. Jones, Macmillan and Co. (1893) のp.183 (Fig.35) およびp.184 (Fig.36)

ヘルツの実験（偏波と屈折）



八角形の木枠に径1mmの針金を3cmごとに張って偏波フィルターとしている。

偏波性の確認

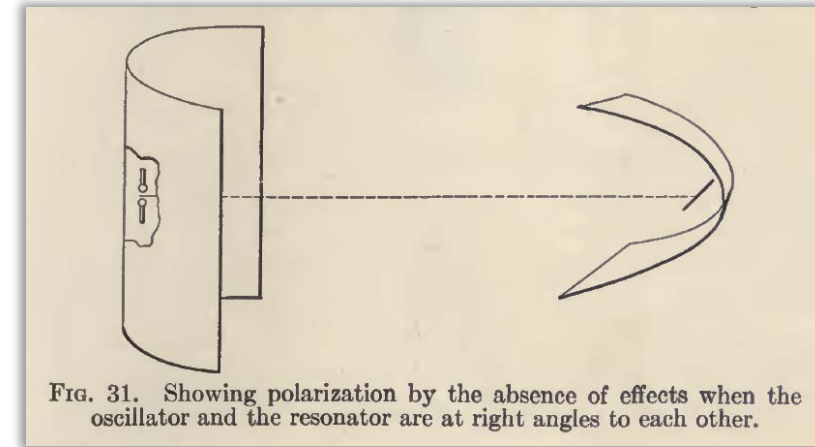
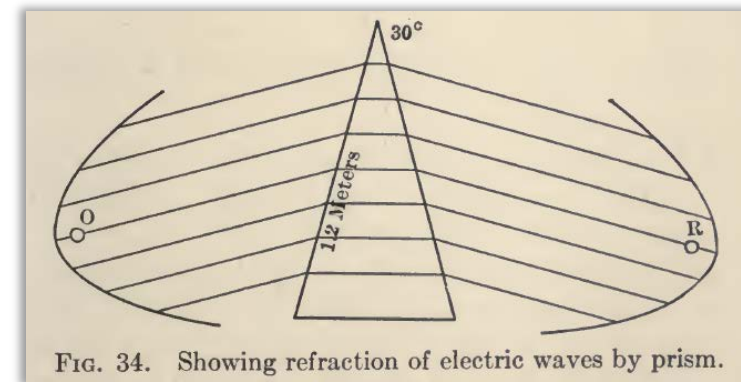
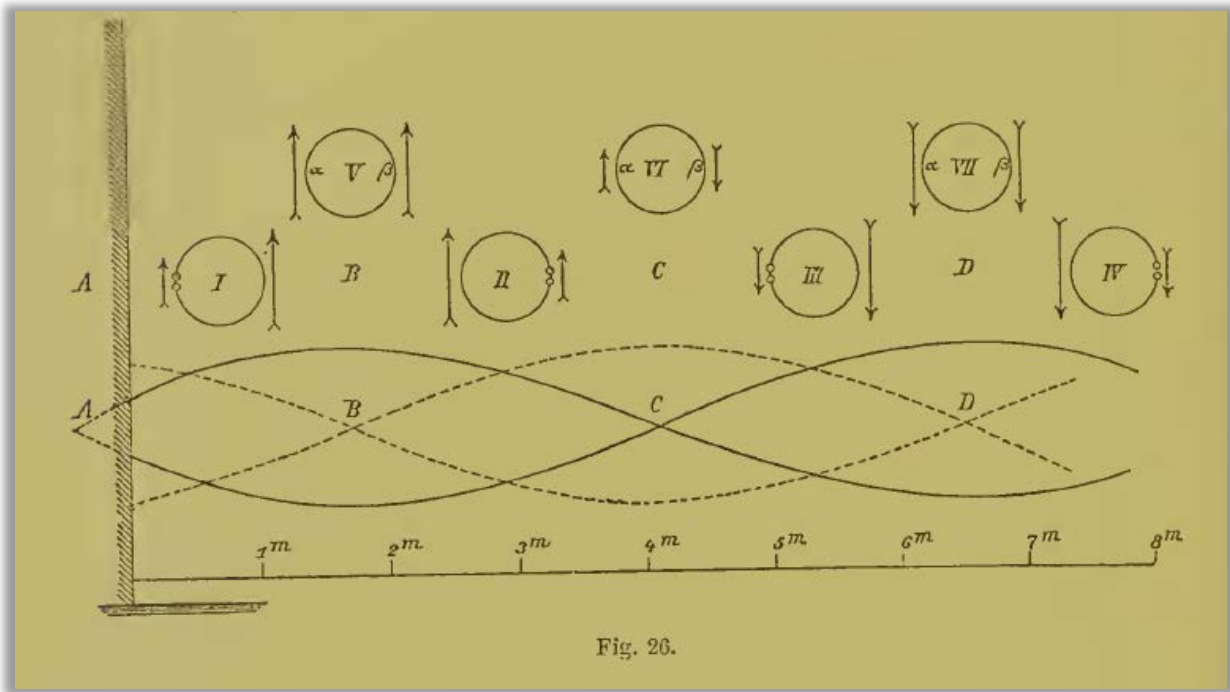


FIG. 34. Showing refraction of electric waves by prism.

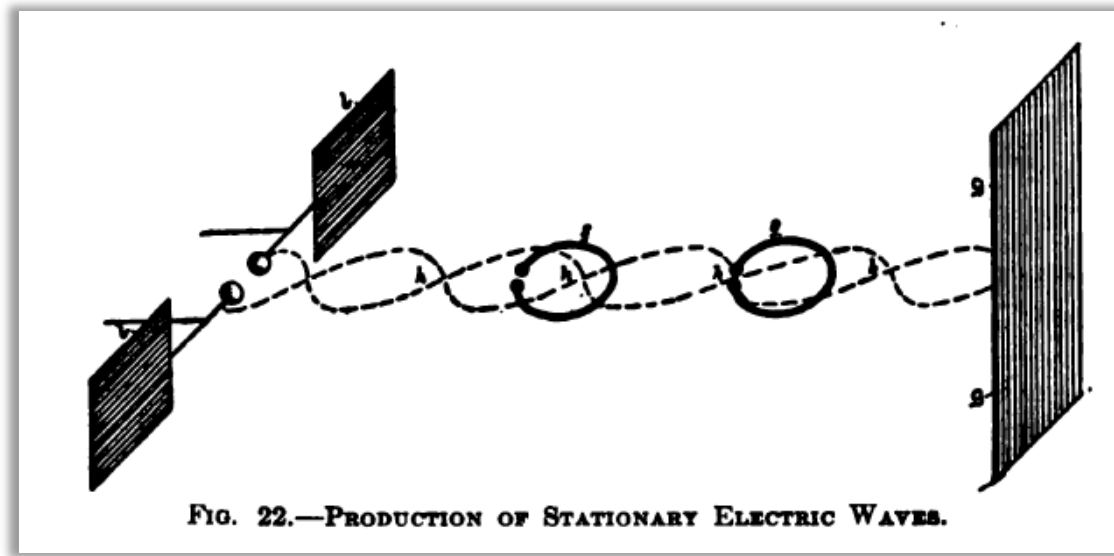


屈折性の確認：電波は 22° 屈折した

ヘルツの実験(反射と定在波)



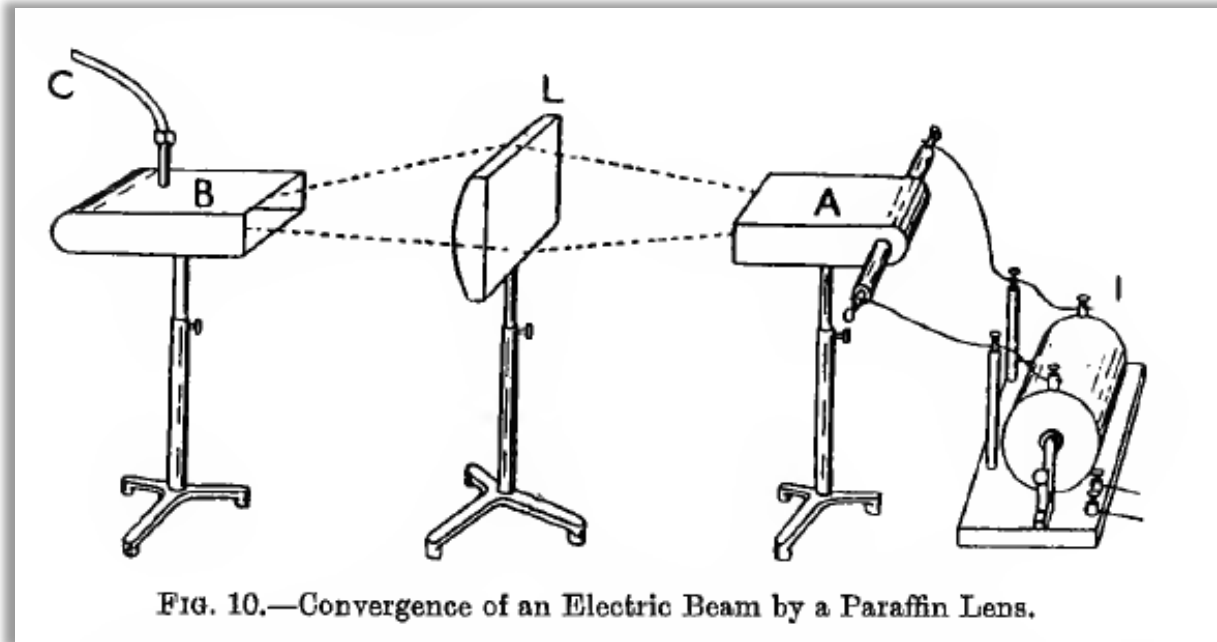
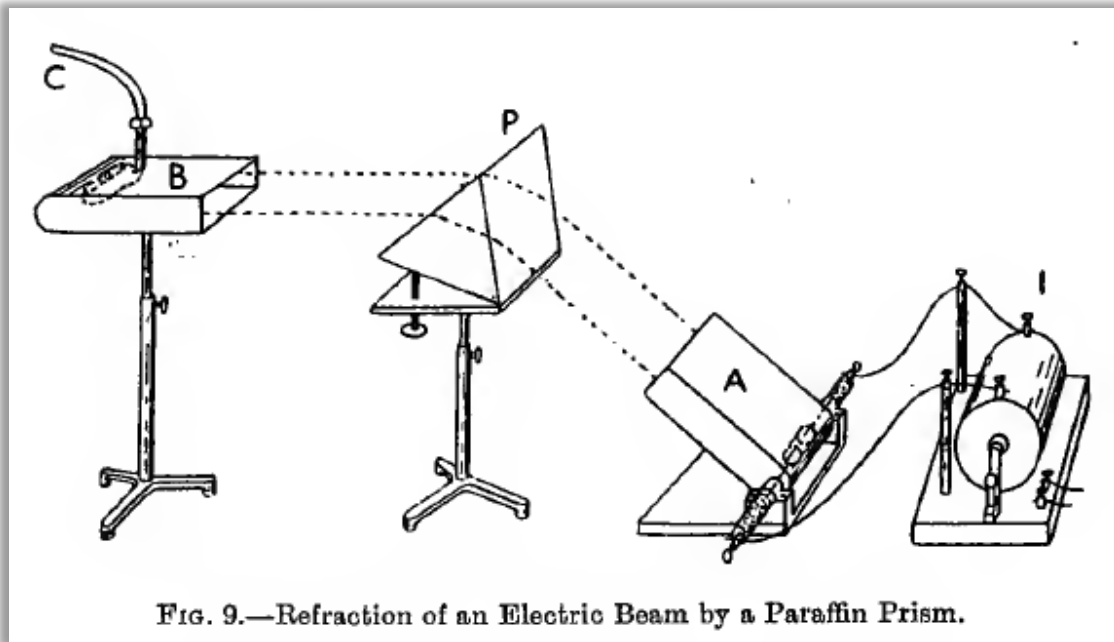
金属シートからの反射による定在波の存在を確認



上図引用: “Wireless Telegraphy, Its History, Theory and Practice,” A. Frederick Collins, p.24 (Fig.22), McGraw Publishing Co. , (1905).

図引用: “Electric Waves being Researches on the propagation of electric action with finite velocity through space” by Dr. Heinrich Hertz, authorized English translation by De. E. Jones, Macmillan and Co. (1893) p.128 (Fig.26)

ヘルツの実験(屈折)



電磁波を放射するスパーク端子はAの中にあり、Bの中に受信側のダイポールがある。受信側ダイポールの中心ギャップに放電が発生するかどうかをCで覗く。

図引用: "The Principles of Electric Wave Telegraphy," J. A. Fleming, p.317 (Fig.9) and p.319 (Fig.10), Longman Green & Co. (1906).

スパークギャップ(火花放電端子)

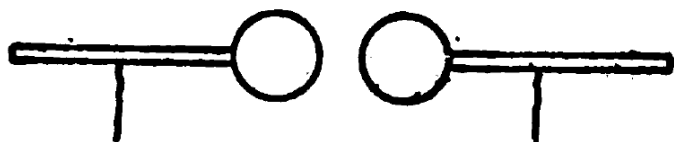


FIG. 39.—USUAL FORM OF SPARK-GAP.



FIG. 41a.—SPARK-GAP WITH POINTED ELECTRODES.

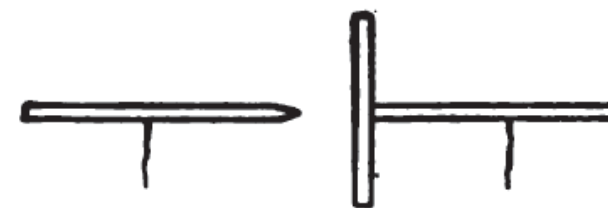


FIG. 41b.—SPARK-GAP WITH POINT AND DISK.

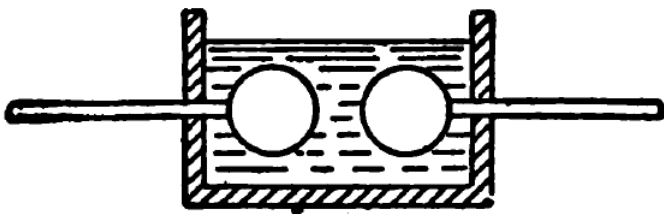


FIG. 40.—SPARK-GAP FORMED OF OIL.



FIG. 41c.—SPARK-GAP WITH POINT AND BALL.



FIG. 41d.—SPARK-GAP BETWEEN DISCS.

図引用: "Wireless Telegraphy, Its History, Theory and Practice," A. Frederick Collins, pp.39-41 (Fig.39-41), McGraw Publishing Co. (1905).