

Entdeckung des Elektrons

Alexander Bigalke

Seminar Schlüsselexperimente der Teilchenphysik

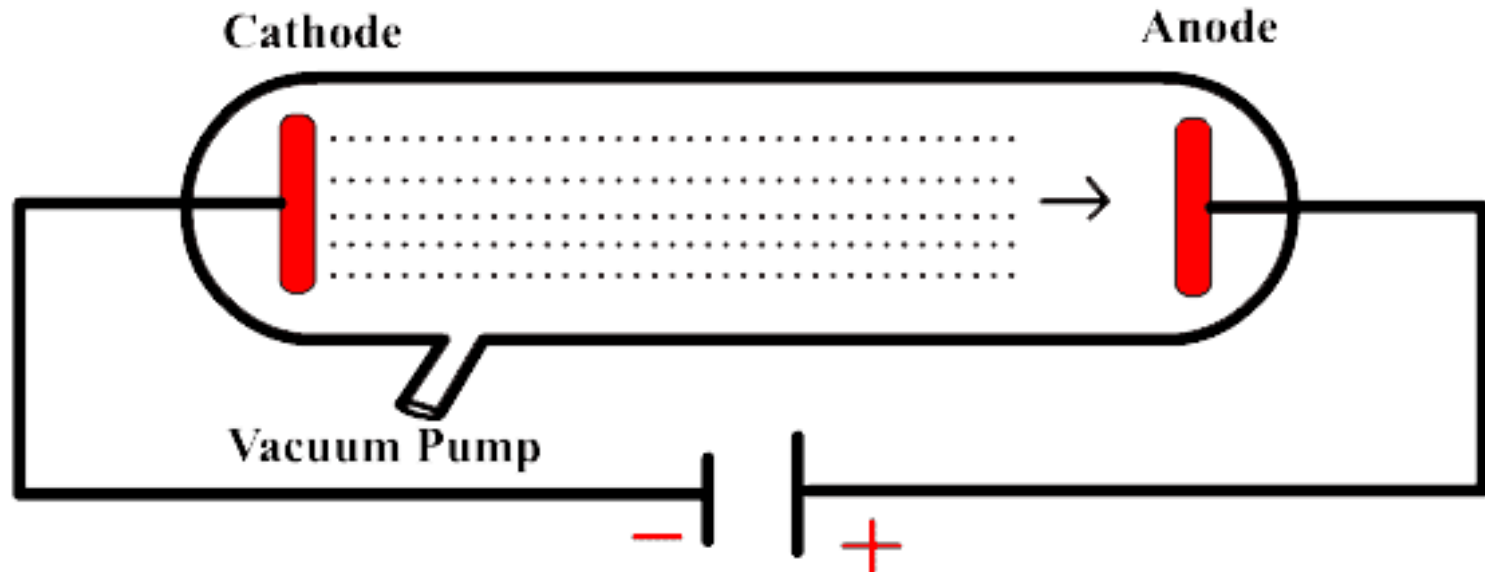
16.10.2015

Struktur

- geschichtlicher Hintergrund
- Thomson-Paper
- weiterer Verlauf

geschichtlicher Einstieg

- Versuchsaufbau zur Untersuchung von Leitung in Gasen
 - mit Vakuumpumpe verbundene Glasröhre
 - zwei Metallplatten an Spannungsgerät (Anode/Kathode)



Quelle: <http://www.citycollegiate.com>

Beobachtungen in Glasröhre

- 1838, Faraday:
 - unterscheidet Leuchterscheinungen vor Anode und Kathode
- 1858, Plücker:
 - bessere Evakuierung durch Quecksilber Vakuumpumpe: 0,008 Torr statt 2-3 Torr
 - zwei verschiedene, unabhängige Effekte
 - Fluoreszieren des Glases in der Nähe der Kathode
- 1869, Hittorf:
 - Schattenwurf  geradlinige Strahlung lässt Glas fluoreszieren
- 1876: Goldstein: „Kathodenstrahlung“

Eigenschaften von Kathodenstrahlen (1870er)

- Aussendung von Kathode senkrecht zur Oberfläche
- geradlinige Ausbreitung
- lassen Glas fluoreszieren
- Ablenkung durch Magnetfelder
- Eigenschaften von Kathodenmaterial unabhängig
- Auslösung chemischer Reaktionen
- Energietransport (Erhitzung)
- Kraftausübung auf Gegenstände

Natur der Strahlen

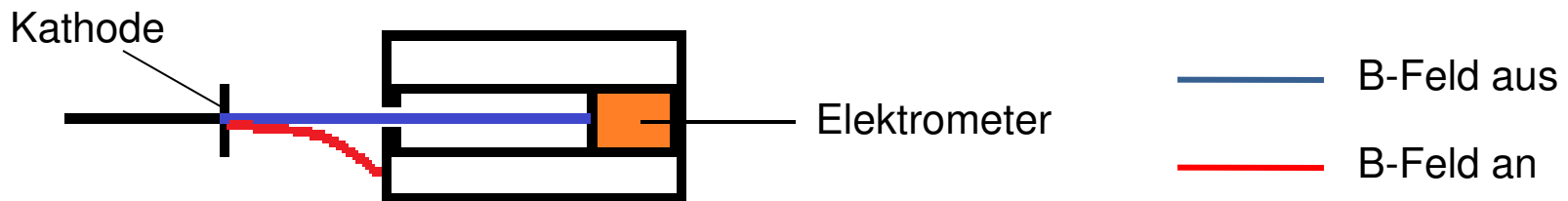
- Crookes: Teilchenstrahlung
 - geladene Moleküle, Leuchten durch Kollisionen
- Hertz, Goldstein, Lenard, Wiedemann: Welle
 - Ätherbewegung/-schwingung erzeugt Leuchten
 - Fehlen elektrostatischer Effekte
 - Durchdringen dünner Metallfolien
- Thomsons These: Teilchennatur der Strahlen
 - Moleküle werden an Kathode in Ionen zerlegt

Thomson-Paper: Struktur

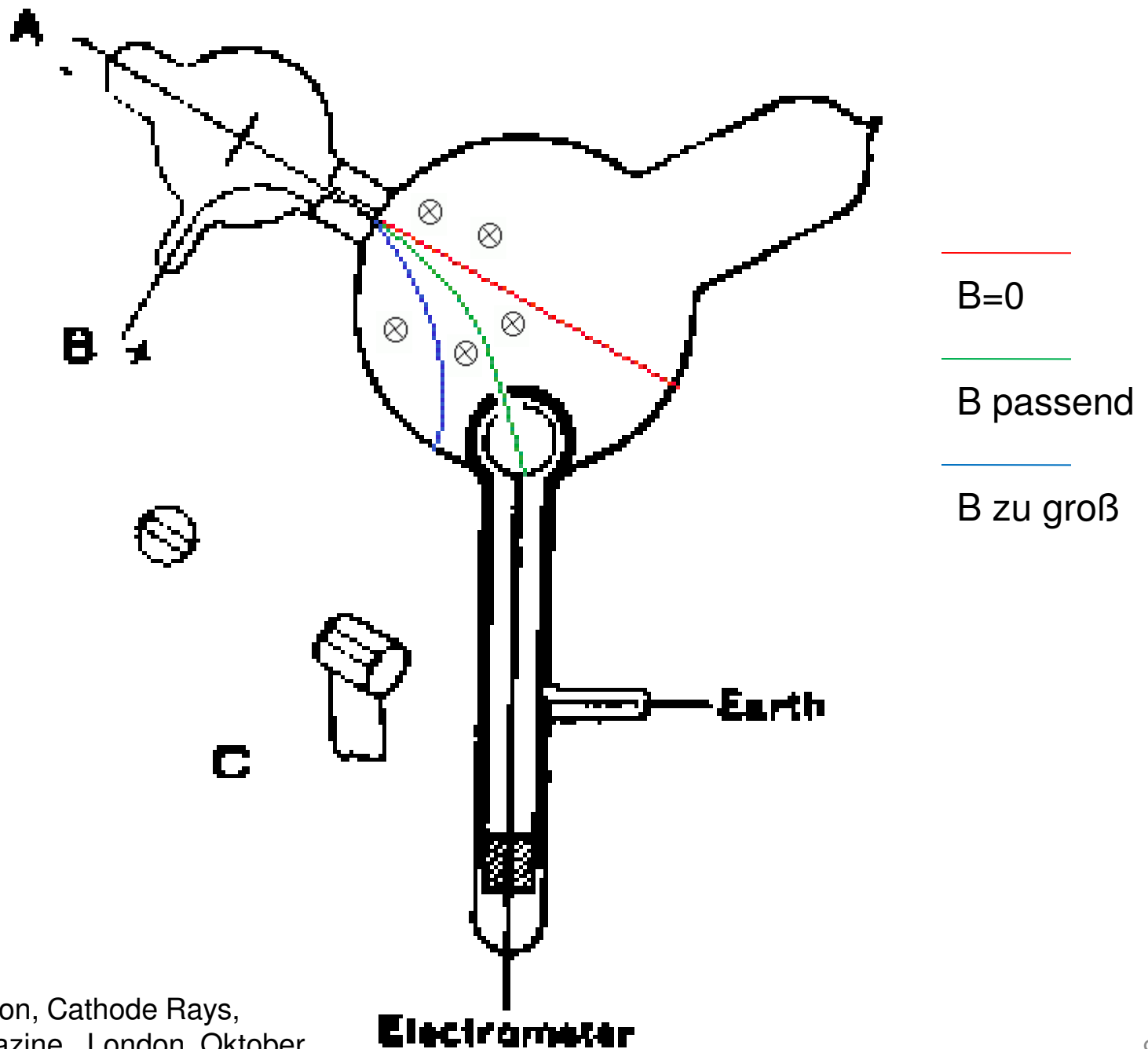
- direkter Zusammenhang zwischen elektrischer Ladung und Kathodenstrahlen
- Ablenkung durch elektrostatisches Feld
- Ablenkung durch magnetisches Feld
- Messung von m/e

Zusammenhang zwischen Strahlen und Ladung

- Teilchen sollten elektrische Ladung tragen
- Versuchsaufbau nach Perrin:



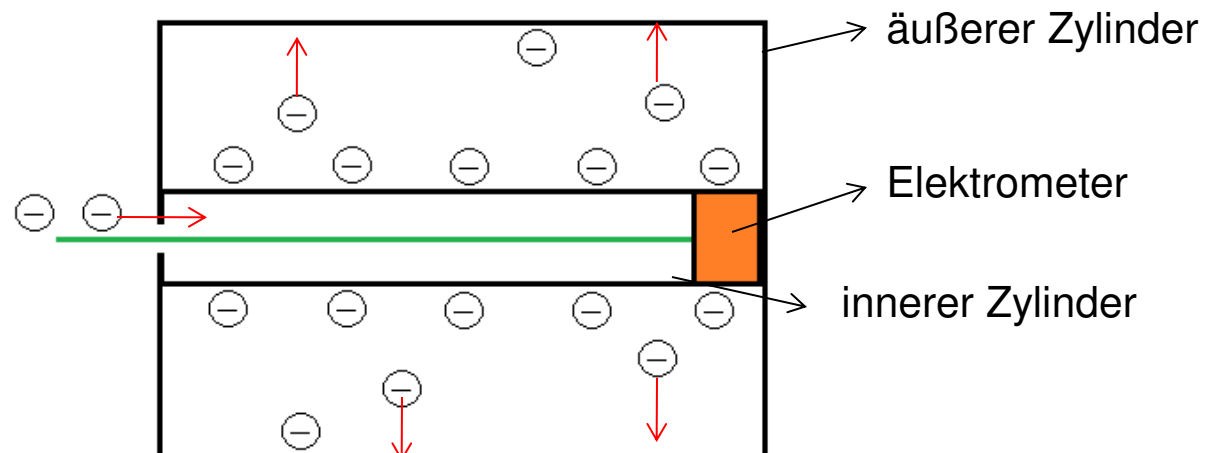
- Ergebnis: Kathode gibt Ladung senkrecht ab, durch Magneten ablenkbar
- Einwand: Ladungsträger nicht in direktem Zusammenhang mit Kathodenstrahl
- neuer Aufbau nach Thomson



Quelle: J.J. Thomson, Cathode Rays,
Philosophical Magazine, London, Oktober
1897, S. 295, nachbearbeitet

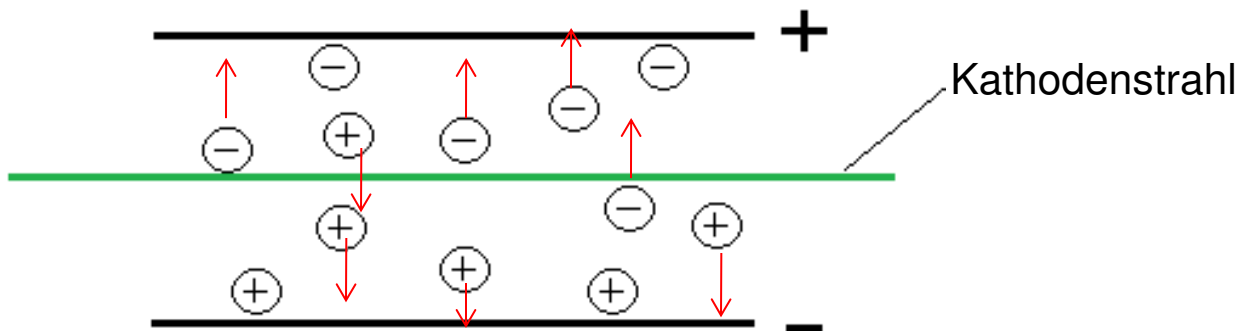
Beobachtungen

- keine Ablenkung / zu starke Ablenkung: kleiner, unregelmäßiger Ausschlag
- Treffen der Öffnung: große negative Ladung
- → negative Ladung unmittelbar mit Strahlen verbunden
- Ladung erreicht Maximum (Gas wird Leiter)

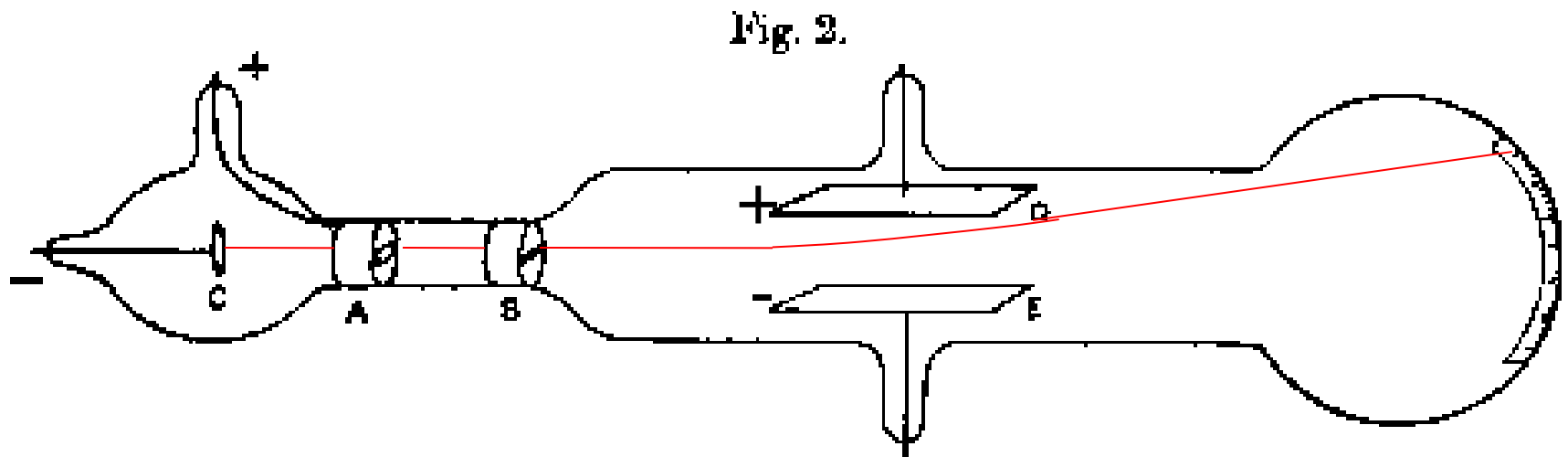


Ablenkung durch elektrostatisches Feld

- bisher: keine Ablenkung bei kleiner Spannung
- Ablenkung bei großer Spannung: verursacht durch Entladung
- fehlende Ablenkung wegen Leitfähigkeit des Gases durch Kathodenstrahlung



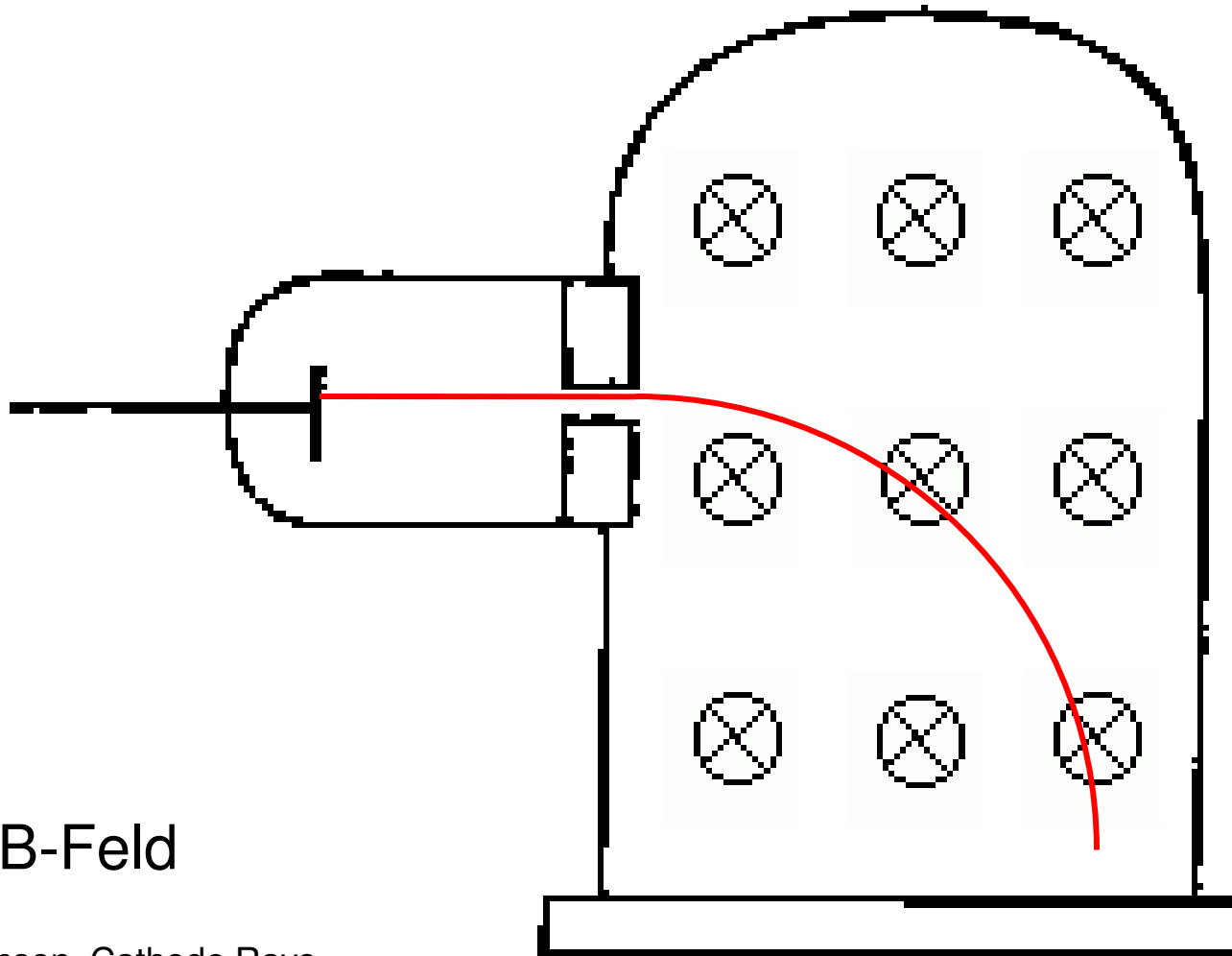
- Leitfähigkeit nimmt mit besserer Evakuierung ab
- Chance: Messung bei sehr hoher Evakuierung



Beobachtungen

- Ablenkung bei starker Entleerung ab Spannung von 2V
- Richtung entspricht der negativer Teilchen
- Ablenkung $\sim$ angelegte Spannung
- Aufspaltung der Strahlen $\longrightarrow$ analog: „magnetisches Spektrum“ (Birkeland)
- Grenzfälle zeigen: Leitfähigkeit verhindert Ablenkung
 - „Grenzdruck“, kleine Spannung
 - starke Evakuierung, große Spannung

Magnetische Ablenkung

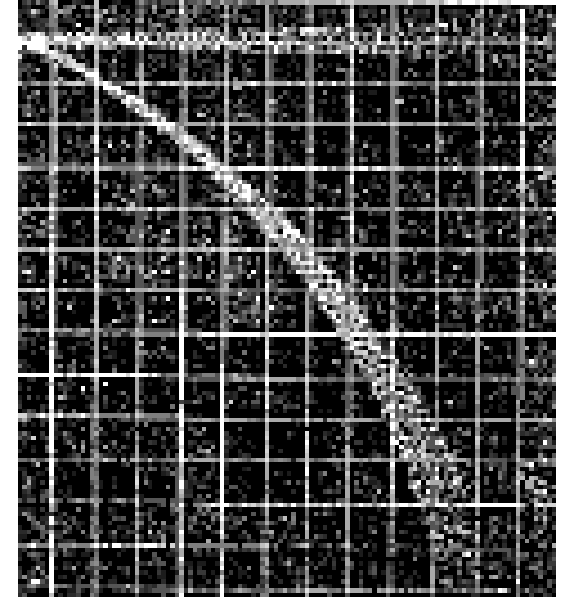


⊗: B-Feld

Quelle: J.J. Thomson, Cathode Rays,
Philosophical Magazine, London, Oktober
1897, S. 301, nachbearbeitet

Beobachtungen

- Strahlen spalten in helle und dunkle Anteile auf, unterschiedliche Ablenkung
→ „magnetisches Spektrum“
- bei gegebenem B-Feld/angelegter Spannung: Weg unabhängig von Natur des Gases (Wasserstoff, Luft, Kohlenstoffdioxid)
- verschiedene Drücke für gleiche Spannung zwischen Anode und Kathode



Quelle: Jörg Meya, Elektrodynamik im 19. Jahrhundert, Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden, 1990, S. 245

Zwischenfazit

- Kathodenstrahlen
 - tragen negative Ladungen
 - werden durch elektrostatische Kraft wie negative Ladungsträger abgelenkt
 - werden durch magnetische Kraft wie negativ geladene Körper abgelenkt, die sich entlang der Strahlen bewegen
- Thomson: Kathodenstrahlen sind negative Ladungen, getragen von Materiepartikeln, „Korpuskeln“
- Was sind diese Teilchen? Atome, Moleküle, Materie feinerer Struktur?

1. Messung von m/e

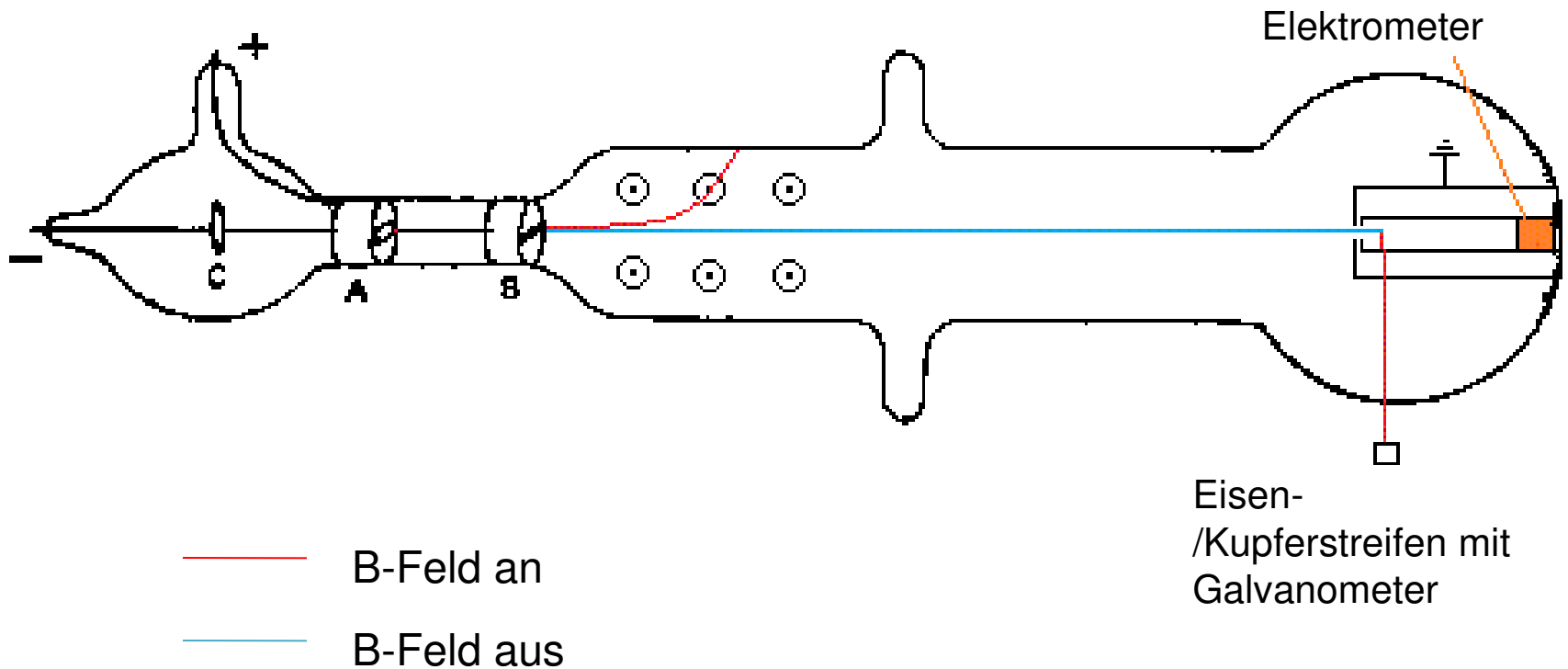
- Ladung eines Strahls $Ne = Q$
- Umwandlung kinetischer in Wärmeenergie $\frac{1}{2} Nmv^2 = W$
- Kreisbewegung durch B-Feld $\frac{mv^2}{r} = evB$

$$\Rightarrow v = \frac{2W}{Q}, \frac{m}{e} = \frac{B^2 r^2 Q}{2W}, Br := I$$

- Q, W, B und r zu bestimmen

m : Masse eines Teilchen, e : Ladung eines Teilchens, v : Geschwindigkeit, N : Anzahl der Teilchen,
 Q : Ladung des Strahls, W : Wärmeenergie, r : Radius, B : Magnetfeldstärke

Versuchsaufbau

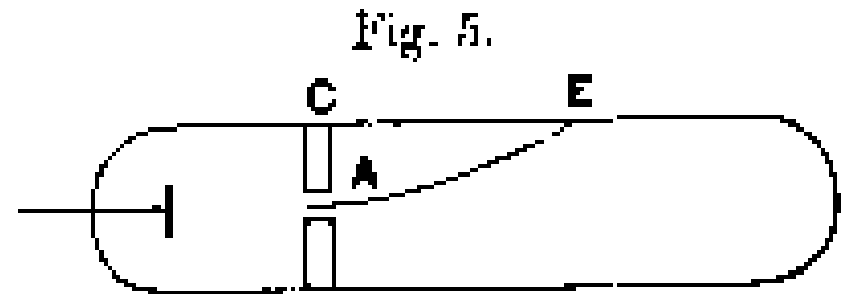


Quelle: J.J. Thomson, Cathode Rays,
Philosophical Magazine, London, Oktober
1897, S. 296, nachbearbeitet

Messvorgang

- Q: zwei isolierte Zylinder mit Elektrometer
- W: mit Galvanometer verbundene Eisen- und Kupferstreifen
 - W aus Temperaturänderung und Wärmekapazität
- B: Helmholtzspule, Messung von I

- r:
$$2r = \frac{CE^2}{AC} + AC$$



Quelle: J.J. Thomson, Cathode Rays,
Philosophical Magazine, London, Oktober
1897, S. 304

Probleme

- r: Aufspaltung der Strahlen, E nicht exakt
- Q: $Q_{real} \succ Q_{gemessen}$, wegen Leitfähigkeit des Gases
- Minimierung durch:
 - große Kapazität des inneren Zylinders
 - kurze Zeitspanne der Strahlen (kaum Wärmeverlust)
- Aufladen des Glases, Entladung vom Zylinder
—→ Glühen der Zylinder, unregelmäßige Ergebnisse
- keine präzisen Ergebnisse zu erwarten

	erg/abC	G*cm	g/abC	cm/s
Gas.	Value of W/Q.	L.	m/e .	v .
Tube 1.				
Air	4.6×10^{11}	230	$.57 \times 10^{-7}$	4×10^9
Air	1.8×10^{12}	350	$.34 \times 10^{-7}$	1×10^{10}
Air	6.1×10^{11}	230	$.43 \times 10^{-7}$	5.4×10^9
Air	2.5×10^{12}	400	$.32 \times 10^{-7}$	1.2×10^{10}
Air	5.5×10^{11}	230	$.48 \times 10^{-7}$	4.8×10^9
Air	1×10^{12}	285	$.4 \times 10^{-7}$	7×10^9
Air	1×10^{12}	285	$.4 \times 10^{-7}$	7×10^9
Hydrogen	6×10^{12}	205	$.35 \times 10^{-7}$	6×10^9
Hydrogen	2.1×10^{12}	460	$.5 \times 10^{-7}$	9.2×10^9
Carbonic acid	8.4×10^{11}	260	$.4 \times 10^{-7}$	7.5×10^9
Carbonic acid	1.47×10^{12}	340	$.4 \times 10^{-7}$	8.5×10^9
Carbonic acid	3.0×10^{12}	480	$.39 \times 10^{-7}$	1.3×10^{10}
Tube 3.				
Air	2.5×10^{11}	220	$.9 \times 10^{-7}$	2.4×10^9
Air	3.5×10^{11}	225	$.7 \times 10^{-7}$	3.2×10^9
Hydrogen	3×10^{11}	250	1.0×10^{-7}	2.5×10^9

heutiger Wert: $\frac{m}{e} = 0,57 \cdot 10^{-7} \frac{g}{abC}$

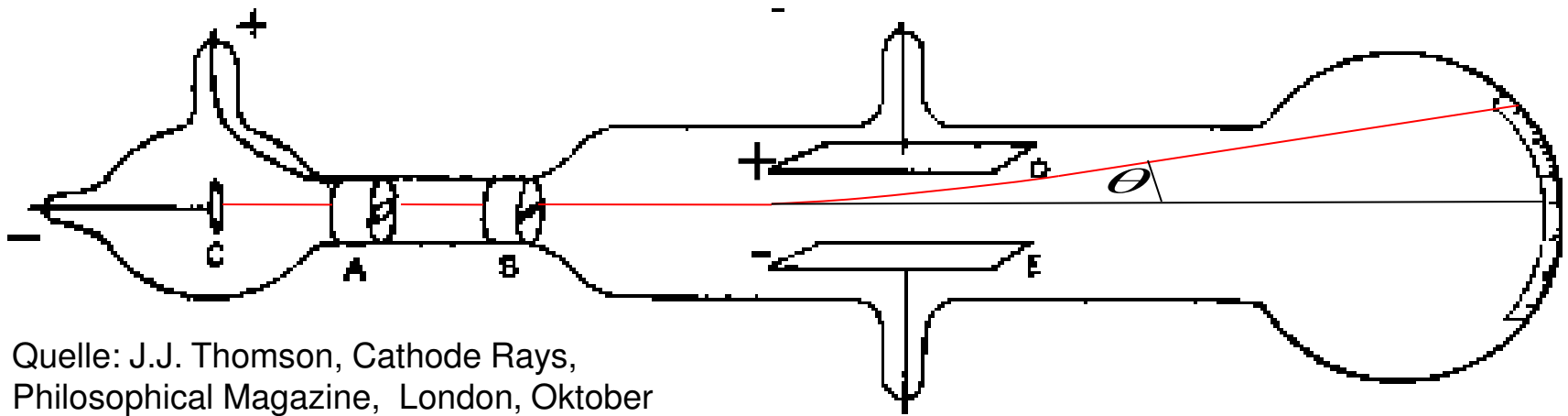
2. Messung von m/e

- Ablekung durch elektrostatisches und magnetisches Feld

- im E-Feld:
$$v_y = \frac{Ee}{m} \frac{l}{v_x} \Rightarrow \theta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{Ee}{m} \frac{l}{v_x^2}$$

- im B-Feld:
$$v_y = \frac{Bev_x}{m} \frac{l}{v_x} \Rightarrow \phi = \frac{v_y}{v_x} = \frac{Be}{m} \frac{l}{v_x}$$

- B, sodass $\theta = \phi \Rightarrow v_x = \frac{E}{B}, \frac{m}{e} = \frac{B^2 l}{E\theta}$



Quelle: J.J. Thomson, Cathode Rays,
Philosophical Magazine, London, Oktober
1897, S. 296, nachbearbeitet

- Bestimmung von B, E (Batterie) und θ (Nadel)
- mittlerer Wert von B: „Probespule“ mit ballistischem Galvanometer
 - > Vergleich von Ausschlag mit Wert in homogenem Feld
- entgegengesetzte Krafrichtung von B außerhalb der Platten vernachlässigt
 - $\Rightarrow B_{real} < B_{gemessen} \Rightarrow m/e \text{ zu groß, } v \text{ zu klein}$

Ergebnis

G abV/cm cm g/abC cm/s

Gas.	θ .	H.	F.	l .	m/e .	v .
Air	8/110	5.5	1.5×10^{10}	5	1.3×10^{-7}	2.8×10^9
Air	9.5/110	5.4	1.5×10^{10}	5	1.1×10^{-7}	2.8×10^9
Air	13/110	6.6	1.5×10^{10}	5	1.2×10^{-7}	2.3×10^9
Hydrogen	9/110	6.3	1.5×10^{10}	5	1.5×10^{-7}	2.5×10^9
Carbonic acid...	11/110	6.9	1.5×10^{10}	5	1.5×10^{-7}	2.2×10^9
Air	6/110	5	1.8×10^{10}	5	1.3×10^{-7}	3.6×10^9
Air	7/110	3.6	1×10^{10}	5	1.1×10^{-7}	2.8×10^9

Quelle: J.J. Thomson, Cathode Rays,
Philosophical Magazine, London, Oktober
1897, S. 309

Schlussfolgerung

- $m/e \sim 10^{-7} \text{ g/abC}$ viel kleiner als Wert von H-Ion (10^{-4} g/abC)
- m klein und/oder e groß
- Fazit: Entdeckung eines neuartigen Teilchens
- alle Elemente = Ansammlung von Korpuskeln
- Ladungsträger in allen Gasen gleich
- Grundmaterie aller Elemente

weiterer geschichtlicher Verlauf

- zunächst Zweifel an Thomsons Theorie
- neue Entdeckungen:
 - Radioaktivität (Becquerel): spontaner Zerfall
 - Messungen von m/e : β -Strahlen = schnelle Korpuskel
 - Erzeugung elektrischer Teilchen durch Fotoeffekt
 m/e stimmt mit Korpuskeln überein
- erstes entdecktes Elementarteilchen
 - Startpunkt für moderne Teilchenphysik

Quellenverzeichnis

- J.J. Thomson, Cathode Rays, Philosophical Magazine, London, Oktober 1897
- Jörg Meya, Elektrodynamik im 19. Jahrhundert, Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden, 1990
- E. A. Davis and I. J. Falconer, J. J. Thomson and the discovery of the electron, Taylor & Francis, London, 1997
- <http://www.citycollegiate.com>