

新稿 物理学概説
下卷

京都産業大学教授 理博
京都大学名誉教授
多田政忠 編

学術図書出版社

新 稿

物 理 学 概 説

下 卷

京都大学名誉教授	多	田	政	忠
前京都大学教授	丹	羽		進
京都大学名誉教授	三	谷	健	次
京都大学名誉教授	竹	山	幹	夫
京都大学名誉教授	川	井	孝	夫
京都大学名誉教授	喜	多	秀	次
京都大学教 授	宮	武	義	郎
京都大学教 授	徳	岡	善	助
京都大学教 授	木	方		洋
	共	著		

学 術 図 書 出 版 社

著者承諾
検印省略

1974年11月 新稿第1版・第1刷発行
1990年2月 新稿第1版・第22刷発行

新稿 物理学概説 下巻

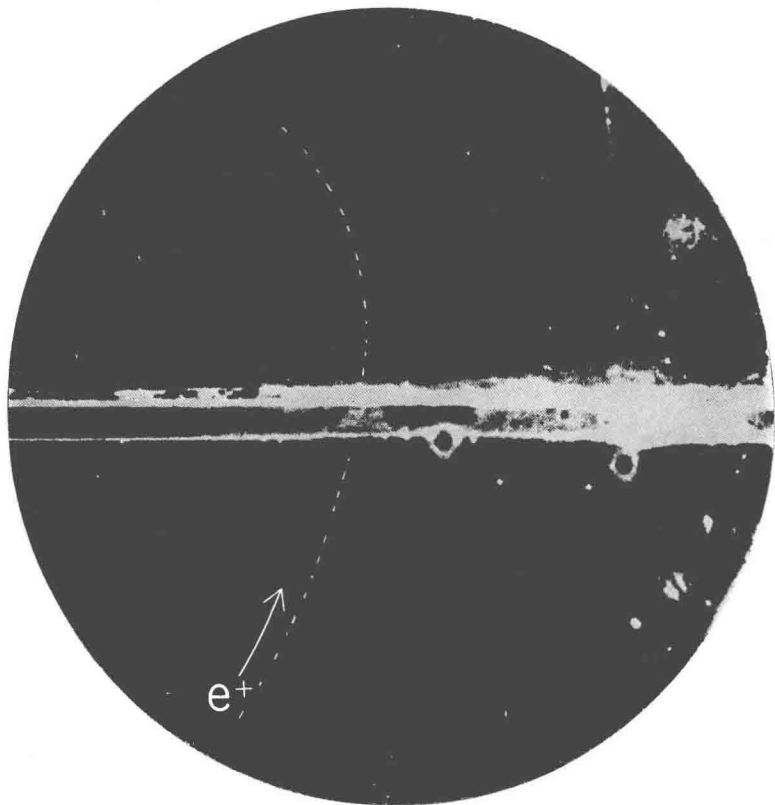
定 価 1751 円(本体1700円)

編 者 多 田 政 忠
発 行 者 発 田 寿 々 子
印 刷 者 矢 部 富 三

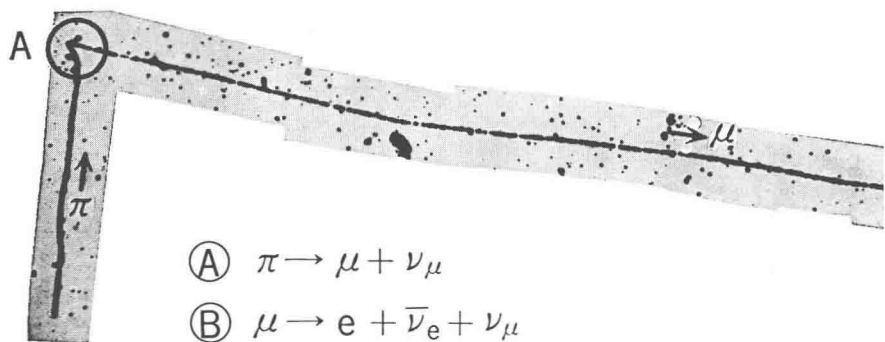
発行所 株式会社 学術図書出版社
東京都文京区本郷5丁目4の6
電話 (811) 0889 振替東京1-28454

三松堂印刷(株)・印刷

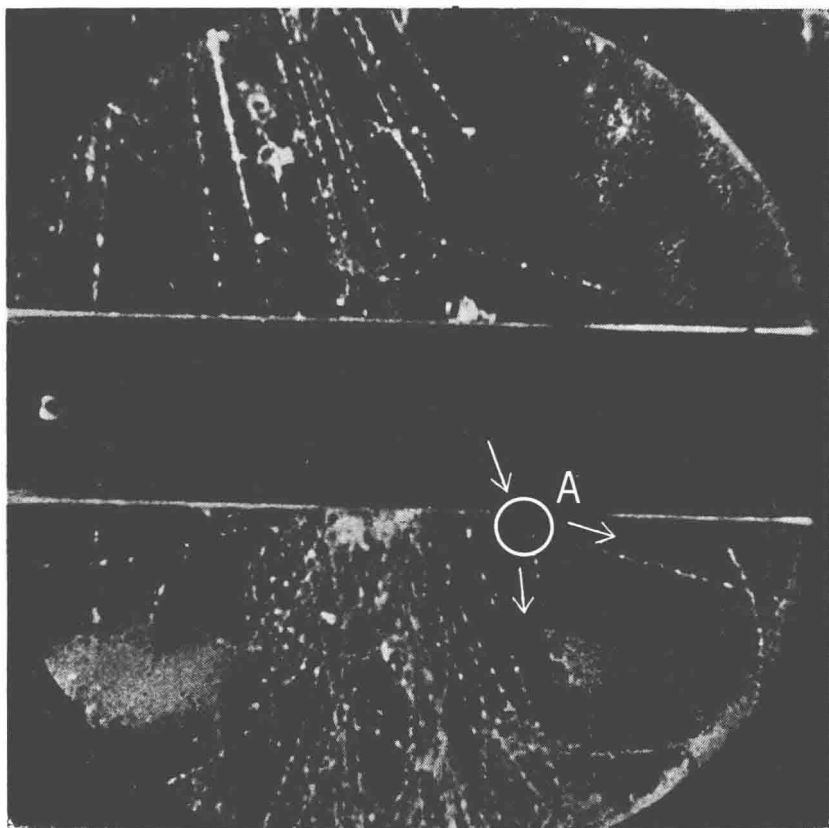
☆乱丁・落丁はおとりかえします



図A 陽電子の発見（宇宙線・霧箱）. 1932年, C. D. Anderson.
磁場によって曲げられる向きから e^+ とわかる.

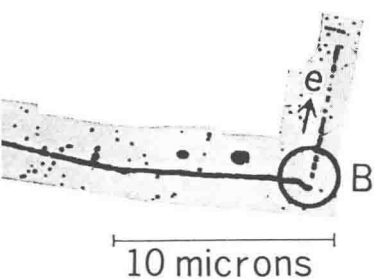


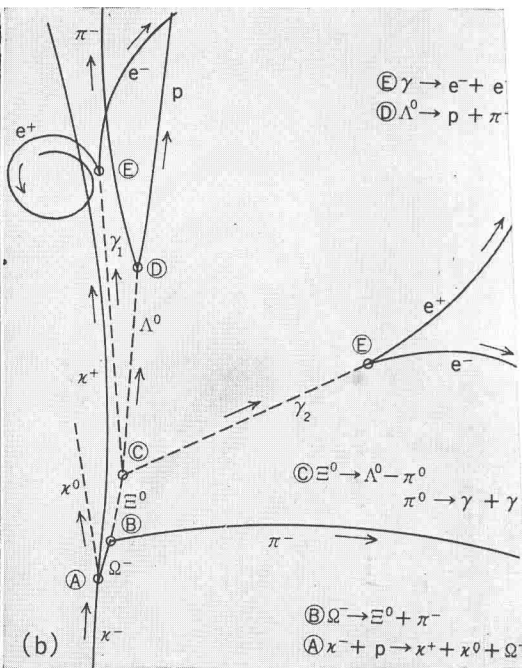
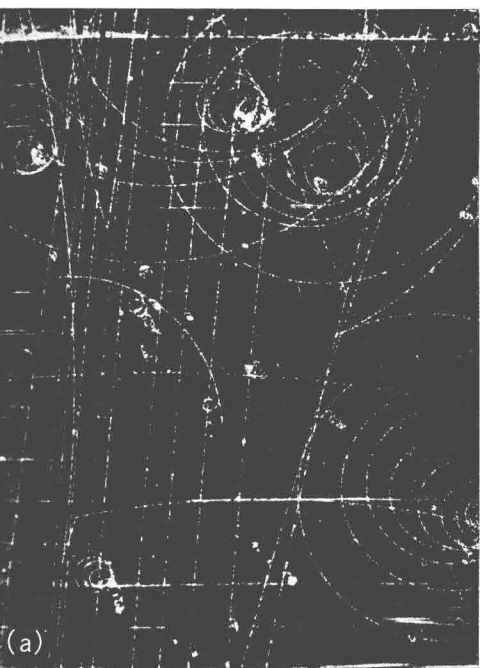
図B π 中間子, μ 粒子の発見（宇宙線・原子核乾板）. 1947年, C. F. Powell.



図C A^0 粒子の発見 (宇宙線・霧箱). 1947年, G. D. Rochester と C. C. Butler

上からきた飛跡の見えない中性粒子 (A^0) が点Aで p と π^- に崩壊している. (図DのD点と比較せよ).





図D Ω^- の発見 (交替勾配シンクロトロン・泡箱).

1964年, Brookhaven 国立研究所 (アメリカ).

下から入射した κ^- が泡箱内の p と衝突して Ω^- を生成し, 生成された素粒子が次々と崩壊してゆくようすが見られる. 点線は見えない中性粒子の飛跡をエネルギー, 運動量の保存則により補ったもの.

目 次

V 電 気 磁 気 学

1 章 真空中の静電場

§ 1	Coulombの法則	1	§ 7	導体の帯電の状態	17
§ 2	電 場 (電界)	4	§ 8	電 像 法	19
§ 3	Gaussの法則	6	§ 9	Maxwell の応力	22
§ 4	Gaussの法則の応用	9	§ 10	電場のエネルギー	25
§ 5	Gaussの法則の微分形	12	§ 11	コンデンサ	27
§ 6	電 位	13		1 章 演習問題	30

2 章 誘電体の中の静電場

§ 1	誘電分極	32	§ 4	誘電体の中の諸法則	40
§ 2	誘電体の中の電場	35	§ 5	電束線・電気力線の屈折	42
§ 3	電束密度	37		2 章 演習問題	44

3 章 磁 気

§ 1	磁 場 (磁界)	46	§ 5	磁 性 体	53
§ 2	磁気に関する Coulomb の法則	46	§ 6	磁場のエネルギーと Maxwell の応力	57
§ 3	真空中の静磁場	48	§ 7	強磁性体	58
§ 4	磁気双極子	50		3 章 演習問題	63

4 章 定 常 電 流

§ 1	Ohm の法則と Joule 熱	65	§ 5	熱起電力	76
§ 2	広がりをもつ導体中の 定常電流	68	§ 6	Peltier 効果と Thomson 効果	79
§ 3	非 Ohm 抵抗	72		4 章 演習問題	81
§ 4	接触電位差	73			

5 章 電流の磁気作用

§ 1 Biot-Savart の法則……………82	算の例 (その 2) ……………91
§ 2 電流の作る磁場の計 算の例 (その 1) ……………84	§ 5 Ampère の法則の微分形…………92
§ 3 Ampère の法則……………87	§ 6 電磁石と磁気回路……………94
§ 4 電流の作る磁場の計	5 章 演習問題……………97

6 章 電流が磁場から受ける力

§ 1 電 磁 力……………98	§ 3 Lorentz 力……………101
§ 2 電流の受ける電磁力……………99	6 章 演習問題……………105

7 章 電 磁 誘 導

§ 1 Faraday の法則……………106	開閉……………114
§ 2 一般的な電磁誘導……………107	§ 5 電磁誘導の応用……………117
§ 3 自己誘導と相互誘導……………111	§ 6 電気・磁気の単位系……………119
§ 4 R, L を含む回路の	7 章 演習問題……………126

8 章 Maxwell の方程式と電磁波

§ 1 電束電流と Maxwell の 基礎方程式……………128	§ 4 光の電磁波説……………137
§ 2 電気振動……………130	§ 5 電磁波の伝送……………139
§ 3 電 磁 波……………133	8 章 演習問題……………144

9 章 電 気 回 路

§ 1 定常電流に対する Kirchhoff の法則……………145	§ 5 相互誘導で結合された 回路……………158
§ 2 交 流……………150	§ 6 三相交流……………159
§ 3 交流の実効値と電力……………154	§ 7 インピーダンス整合……………161
§ 4 複素数による交流の 表わし方……………155	9 章 演習問題……………162

10章 エレクトロニクス

§ 1 熱電子管……………	165	§ 4 変調と検波……………	177
§ 2 トランジスタ……………	169	§ 5 レーザ……………	178
§ 3 フィードバック……………	174	10章 演習問題……………	182

Ⅵ 近代物理学

1章 特殊相対性理論

§ 1 Newton 力学における空間と時間, Galilei の相対性原理……………	184	§ 6 「同時」の相対性, 空間的距離の相対性……………	194
§ 2 世界エーテルと Maxwell の電磁気学……………	186	§ 7 Lorentz 変換……………	196
§ 3 Michelson-Morley の実験……………	188	§ 8 Lorentz 変換からの帰結……………	200
§ 4 Einstein の特殊相対性原理, 光速不変の原理……………	190	§ 9 相対論的力学……………	203
§ 5 時間の概念, 「同時」の定義……………	191	§ 10 質量とエネルギーの等価性……………	210
		§ 11 電磁場の変換則, 電荷密度および電流密度の変換則……………	211
		1章 演習問題……………	214

2章 量子論

§ 1 熱放射とエネルギー量子……………	215	理……………	240
§ 2 光の粒子性, 光子……………	219	§ 6 電子の波動性, de Broglie 波……………	247
§ 3 原子スペクトル, 原子の構成要素……………	225	§ 7 波動力学, Schrödinger 方程式……………	250
§ 4 Bohr の古典量子論, 量子数……………	230	§ 8 行列力学……………	257
§ 5 スピン量子数, 排除原理……………		§ 9 量子力学における状態の概念……………	264

§ 10 不確定性関係, 二重性 の統一的理解……………	272	2 章 演習問題……………	277
---------------------------------	-----	---------------	-----

3 章 統 計 力 学

§ 1 統計力学の基礎的事項…	279	§ 4 Bose 統計と Fermi 統計……………	292
§ 2 Boltzmann 統計……………	284	§ 5 結晶内の電子……………	299
§ 3 Boltzmann 統計の例 (磁性・比熱)……………	287	3 章 演習問題……………	303

4 章 原子核と素粒子

§ 1 原子核とその構成要素…	305	§ 6 核分裂と核融合……………	331
§ 2 原子核の性質……………	306	§ 7 素粒子とその分類……………	335
§ 3 質量公式と核の安定性…	315	§ 8 素粒子の相互作用……………	348
§ 4 放射性崩壊……………	320	4 章 演習問題……………	356
§ 5 核 反 応……………	326		

演習問題 解答……………	359
和英対訳 索引……………	383
索 引……………	395
物理定数表……………	巻末

V 電気磁気学

1 章 真空中の静電場

§1 Coulomb の法則

摩擦電気 物質は電氣的構成をもっている原子・分子よりなり、2つの物体を摩擦しあうと電気を生ずる。たとえば、ガラス棒を絹の布で摩擦すると、境界面を通して、電荷が移動する。これは、境界面に生ずる熱、歪などのほか、界面の複雑な性質によるものとされている。さらに、物体を相互に引離すと、移動した電荷はそのまま分離して残り、物体は帯電して電気を生ずる*。

このような摩擦電気は摩擦しあう一方の物体には正、他方には負と、必ず一対になって現わ

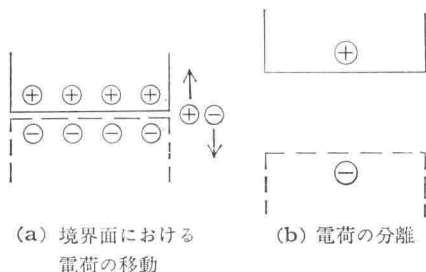


図 1-1 摩擦電気

れる。つぎの系列の2つのものを摩擦しあうと、左のものは正、右のものは負に帯電する。これを帯電列という。

⊕ 毛皮, ガラス, 絹, 毛, 金属, ゴム, こはく, エポナイト ⊖

電気に関する Coulomb (クーロン) の法則 Coulomb は、微小な力を測定するのに便利なねじれ秤を使って実験し、次の法則を得た (1785)。「電

* 空気中の湿度が約 30% 以下のとき、化繊のじゅうたんの上を歩くと、人は 1~2 万ボルトに帯電することがある。

気量がそれぞれ q_1, q_2 の2つの点電荷* は、電気量の相乗積に比例し、その間の距離 r の2乗に反比例する力 F を及ぼしあい、その力の方向は、それらを結ぶ直線の上にある。」すなわち

$$F = \frac{1}{k} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1.1)$$

ここに、 k は周囲の空間の性質と単位のとりに方に関する比例定数である。

(1.1) の力は、大きさと方向をもっているので、ベクトルであり、 $\mathbf{r}_0$ を q_1 から q_2 に向かう単位ベクトルとすると、 q_2 が q_1 から受ける力 $\mathbf{F}$ は

$$\mathbf{F} = \frac{1}{k} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (1.2)$$

と表わすことができる。 q_1, q_2 は正負の符号をもち、同種の電気ของときは斥力、異種の電気ของときは引力となる。この力を **Coulomb 力** という**。

静電単位系 (1.1) の定数 k を1として、真空中で強さの等しい2つの点電荷が、1cm の距離で及ぼしあう力が 1 dyn であるとき、そのおのおのの電気量を単位として、これを 1 CGS 静電単位 (記号 CGSesu) の電気量と定める。また、これをもとにして、電気、磁気に関する量の次元を定めるとき、この単位系を、**静電単位系** という。この場合真空中の Coulomb の法則 (1.1) は次のようになる。

$$\mathbf{F} = \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (1.3)$$

電気量の静電単位は、実用的には小さすぎるので、適当な大きさをもった**実用単位 C** (クーロン coulomb) が使われる。

$$1C = 3 \times 10^9 \text{ CGSesu}$$

MKS 単位系 この単位系では電気磁気に関する量として、便利な実用単位を選び、長さ、質量、時間に MKS 単位をとる。さらに、のちに出てくる多くの関係式を簡単にするため $k = 4\pi\epsilon_0$ とする***。このとき比例定数 k の数値はつぎのようになる。

* 電荷とは、電気現象の源となる実体をいい、その大きさが、それらの間の距離に比べて無視できるほど小さいときに点電荷という。なお、電荷は電気量の意味にも使われる。

** この法則のべき2は、大体 10^{-15}m (水素原子の核) から実験室 (シールドルーム) の大きさにわたって 10^{-9} の精度で実験的に確かめられている。

*** $1/k = 8.988 \times 10^9 \Rightarrow 9.0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ 。

$$k = 10^7/c^2 \doteq 1/(9 \times 10^9), \quad (c \text{ 真空中の光速}). \quad (1.4)$$

したがって、Coulomb の法則 (1.2) は

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (1.5)$$

で表わされる。\$\epsilon_0\$ の数値と単位は上の 2 つの式から*

$$\epsilon_0 = 10^7/4\pi c^2 \text{ kg}^{-1} \text{ m}^{-3} \text{ s}^2 \text{ C}^2 = 8.854\,185 \times 10^{-12} \text{ F/m}. \quad (1.6)$$

となり、これを真空中の誘電率または誘電容量という。

MKS 系で、電気量 \$Q\$ の単位 C (クーロン) を第 4 の基本単位に選んだ場合の単位系を、特に MKSQ 単位系という。これに対して、電流 \$I\$ の単位 A (アンペア ampere) を第 4 の基本単位に選んだ場合の MKSA 単位系が近年広く用いられている。

単位系間の関係については、7 章 § 6 に改めて一括してのべるが、ここでは、とくに断わらない限り、MKSA 単位系を用いる。

Coulomb 力の重ね合せ Coulomb の法則 (1.5) は 2 つの電荷 \$q_1, q_2\$ の間に作用する力を示している。1 つの電荷 \$q\$ が同時に多数の電荷 \$q_i\$ の作用を受けるときの力 \$\mathbf{F}\$ は、おのおのの電荷 \$q_i\$ が、お互いに他と独立に \$q\$ と作用する力 \$\mathbf{F}_i\$ のベクトル和になっている。すなわち、\$\mathbf{F} = \sum \mathbf{F}_i\$ となり Coulomb 力に関し、重ね合せの原理が成り立つものである。

電気量保存の法則 いろいろな経験を総合すると、物体の帯びる電荷は巨視的にみて中和したり、導体を伝わって移動したり、イオンとなって正負に分かれたり、また素粒子の消滅や創生の過程で移っていくことがあるが、「限られた部分の中の全電気量は、系の中に変化があっても、系の外との間に電気量の出入りのない限り、一定である。」これを、電気量保存の法則という。

媒達説 上でのべたように、電荷と電荷との間には力が作用するが、この電気力を考えるのに 2 つの立場がある。すなわち、電気力は途中の空間に

* \$1 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2 = 1 \text{ N} = 10^5 \text{ dyn}\$, N (ニュートン newton).

また、F (ファラッド farad) はのちにのべる電気容量の単位である。

関係せずに、電荷と電荷との間で直接働くと考える直達説または遠隔作用説と、途中の空間を介して伝わると考える媒達説または近接作用説とである。Faraday は、実験上のいろいろな事実から後者の考えをいただき、Maxwell は Faraday の考え方と、当時行なわれていた流体力学や弾性力学との対応性から、媒達説に基礎をおく Maxwell の電磁場論と名づけられる体系を完成した。

問1 $+20\mu\text{C}$ と $+30\mu\text{C}$ との2つの点電荷が、3m 離れておかれている。この間に働く力を求めよ。 答 0.6N.

§2 電 場 (電界)

電場の強さ (E) 電荷が分布している真空の空間を考える。この空間の任意の1つの点 P に電荷を置けば、これに Coulomb 力が作用する。このような電気力の働く空間を電場または電界という。また、電場の1つの点に、 $+1$ 単位の点電荷 (試験体) をおくと、これに作用する電気力 E を、その点における電場の強さ、力の向きを電場の向きという。ただし、この試験体は、それをもちこむことによって、もともとある電場を乱してはならない。電気力は電荷 (電気量) の大きさに比例する。

したがって、強さ E の電場の中にある点電荷 q_0 のうける電気力は

$$F = q_0 E. \quad (2.1)$$

E の単位は、N/C であるが、§6 でのべるように、これに等しい V/m を使うことが多い*。

この章では静止した電荷の作る電場のみを扱う。これを静電場という。静電場においては、 E は位置座標のみの関数で時間変数に関係しない。

分布している電荷の作る電場 電気量 q の点電荷が、それから r をへだてた点 P に作る電場の強さ E は、Coulomb の法則 (1.5) および

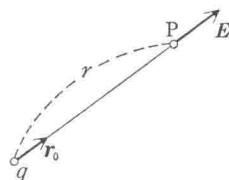


図1-2 点電荷の作る電場

* V (ボルト volt) は電位や起電力の単位。§6 参照

(2.1) から

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (2.2)$$

となる*. ここに $\mathbf{r}_0$ は q から P に向かう単位ベクトルである.

つぎに, 多くの点電荷 $q_1, q_2, q_3, \dots$ が P 点につくる電場 $\mathbf{E}$ は, ある1つの電荷 q_i による電場の強さを $\mathbf{E}_i$ とすると, Coulomb 力の重ね合わせによって $\mathbf{E}_i$ をベクトルの的に合成したものである

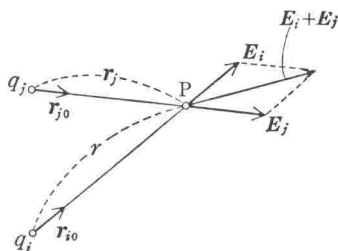


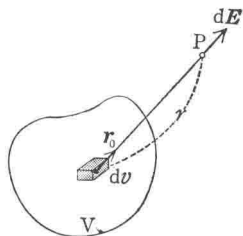
図 1-3 点電荷系の作る電場

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \sum \mathbf{E}_i \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum \left(\frac{q_i}{r_{i0}^2} \mathbf{r}_{i0} \right). \end{aligned} \quad (2.3)$$

ここに, $\mathbf{r}_{i0}$ は q_i から P に向かう単位ベクトル, r_i は q_i と P との間の距離である(図 1-3).

なお, 電荷が体積密度 ρ で連続的に分布しているときには, 上の式はつぎの積分形に書かれる**.

$$\mathbf{E} = \int_V d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho \mathbf{r}_0}{r^2} dv. \quad (2.4)$$



積分範囲 V は, 電荷が分布している体積全体で 図 1-4 体積分布による電場ある.

線分布または面分布の電荷に対しても, 同様に考えられる.

問2 無限に長い直線上に線密度 λ で一様に分布した電荷が, この直線から垂直距離 r の点につくる電場の強さを求めよ. 答 $\lambda/2\pi\epsilon_0 r$.

問3 半径 a の円輪の上に, 一様な線密度 λ で分布している電荷がある. 円輪の中心から距離 x にある, 中心軸上の点の電場を求めよ.

答 $E = a\lambda x/2\epsilon_0(a^2 + x^2)^{3/2}$, 軸方向.

* この電場を **Coulomb 場** ということがある.

** 電荷が分布している内部の点においても(2.4)式は成り立つ。(証明略)

例題 1 面密度 σ で一様に帯電した、無限に広い平面板の作る電場を求めよ。

解 無限平面から距離 x だけ離れた点 P における電場の強さ E を求める。点 P から平面に下した垂線の足を O とする。平面上で O を中心とし、半径 a と $a+da$ との間の円輪にある電荷の作る電場 dE は問3から、 OP の方向を向き、線密度 $\lambda = \sigma \cdot 1 \cdot da$ として、その大きさは

$$dE = \frac{\sigma x da}{2\epsilon_0(a^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

よって、 E は面に垂直外向きで、大きさは

$$E = \int dE = \frac{\sigma x}{2\epsilon_0} \int_0^\infty \frac{a}{(a^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} da.$$

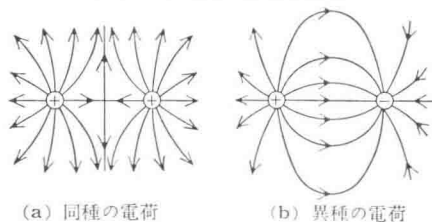
$a^2 = t$ とおき、 $ada = dt/2$ から

$$E = \frac{\sigma x}{4\epsilon_0} \int_0^\infty \frac{dt}{(t + x^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\sigma x}{4\epsilon_0} \left[-\frac{2}{(t + x^2)^{\frac{1}{2}}} \right]_0^\infty = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}.$$

電場の強さは、位置によらず一定となる。(平面上では電場の強さはゼロ)

電気力線と電気力管 電場の中の曲線で、その上の任意の点における接線が、その点の電場 E の方向と一致するものを**電気力線**といい、電場の向きを**電気力線の向き**と定める。電気力線で囲まれた管を**電気力管**という。

流体の運動を調べる場合、空間の各点に速度ベクトル u を定め、流線・流管を作ることができた。静電場においては、電場ベクトルの電気力線と電気力管がこれに対応する。



(a) 同種の電荷

(b) 異種の電荷

図 1-6 電気力線

§3 Gauss の法則

ベクトル束 密度一定の流体が流管の中を定常的に流れている(図1-7)。流管中の点 P における流体の速度を u 、微小面積を dS とし、 dS の法線ベクトル n と u とのなす角を θ とする。 dS を通って単位時間に流れる流体の

* その面の法線の方向に沿うた単位ベクトルを法線ベクトルという。

体積は $u \, dS \cos \theta$ となる. $\mathbf{u}$ と $\mathbf{n}$ とのスカラー積を用いると

$$u \, dS \cos \theta = u_n \, dS = \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \, dS = \mathbf{u} \cdot d\mathbf{S} \quad (3.1)$$

となり*, これはベクトル $\mathbf{u}$ が dS を $\mathbf{n}$ 方向に貫ぬく束または流束といわれる. 更に, 流管の任意の断面 S 全体についての流束の総和は, 面積積分 $\int_S \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \, dS$ となり, これに一定の密度を掛ければ S を通る流量がわかる.

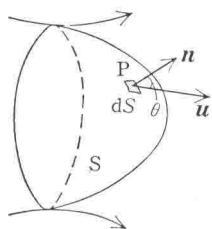
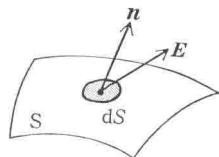


図1-7 ベクトル束

電力束 一般に上で述べた束の考えを, 流れベクトルでない場合にも拡張して考える. ここで電場ベクトル $\mathbf{E}$ を考えて, $\mathbf{E}$ の束を電力束という. これを dN で表わすと

$$dN = \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} \, dS = \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}. \quad (3.2) \quad \text{図1-8 電力束}$$



また, S を1つの閉じた面とし, 全体についての電力束の総和 N を**電力束**という. すなわち,

$$N = \oint_S \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} \, dS = \oint_S E_n \, dS = \oint_S E \cos \theta \, dS. \quad (3.3)$$

ここに, $\oint_S$ は閉曲面 S 全体についての面積積分を意味し, このときの法線ベクトル $\mathbf{n}$ の正の向きは, 面の外側に向かってとる.

Gauss の法則 1つの点電荷 q の作る電場の中で, q を囲む任意の閉じた曲面 S を考える. この S を貫ぬく全電力束 N は, (2.2) の $\mathbf{E}$ を (3.3) に入れて

$$N = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \oint_S \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{r}_0}{r^2} \, dS = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \oint_S \frac{\cos \theta}{r^2} \, dS. \quad (3.4)$$

ここに θ は, q から dS に向かう単位ベクトル $\mathbf{r}_0$, すなわち $\mathbf{E}$ の方向と, dS における外向き法線ベクトル $\mathbf{n}$ とのなす角である.

* $dS = \mathbf{n} \, dS$ は dS を大きさ, $\mathbf{n}$ の方向を向きとし, 面積ベクトルとよばれる.