

講義

LECTURE

01

電磁気学の 学び方

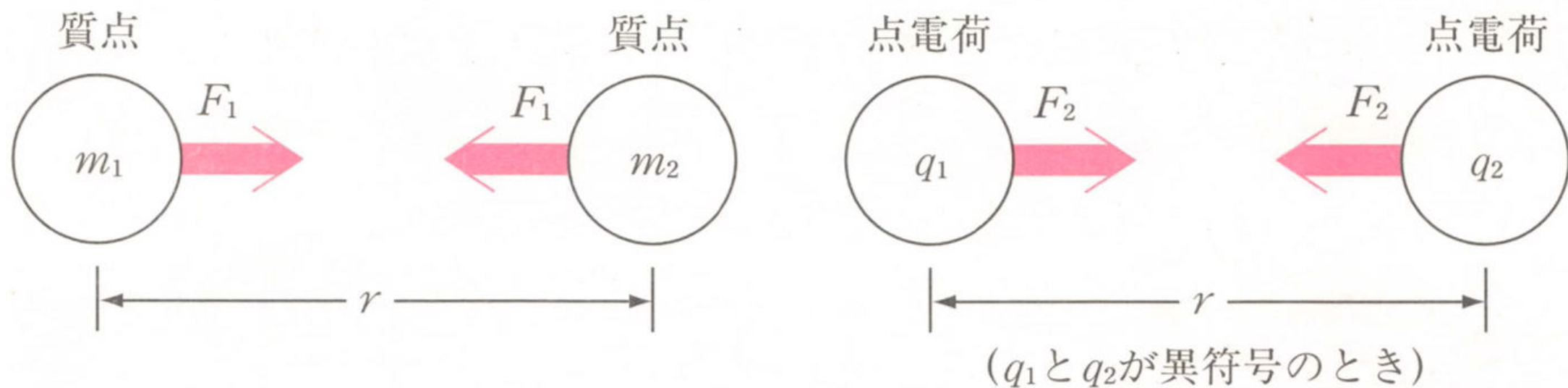
講義をはじめるに先立ち、まず電磁気学全体を通じて押さえておくべきポイントを列挙しておこう。その理由は、まえがきに述べた通り、電磁気学を楽しく学ぶためには、電磁気学の体系全体を把握しておく必要があるからである。

このような心構えひとつで、難しそうに見える電磁気学が、「けっこうやさしい、けっこう面白い」ということになるのである。

●クーロンの法則と万有引力の法則

高校の物理を一通り学んだ人は、電磁気学の出発点であるクーロンの法則が、力学の万有引力の法則と非常によく似ていることを知っておられるであろう。

図1-1 ● 万有引力とクーロン力



万有引力の法則は次のようなものである。質量 m_1 , m_2 の2つの質点が、距離 r だけ離れて存在するとき、この2つの質点間に働く万有引力の大きさは、

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

一方、電気量 q_1 , q_2 の2つの点電荷が、距離 r だけ離れて存在すると

き、この2つの点電荷に働くクーロン力(静電気力)の大きさは、

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

である。

この類似は、もちろん偶然ではないだろう。この2つの法則がいつていることは、**重力と電気力は自然のしくみとして同じ構造をしている**ということである。であるから、いちばん最初に押さえておきたいポイントは、万有引力の物理学と電気力の物理学は、本来、同じ形式で書くことができるはずだということである。

にもかかわらず、力学のテキストの万有引力の法則の章と、電磁気学のテキストの中身は、似ても似つかないものになっている(位置エネルギーと電位など、似ているところもあるが)。このことを、なぜだ?と思うところから、電磁気学のプレーがはじまるのである。

じつは、現代の物理学の最先端においてすら、重力と電気力は統一されていない。非常に似ているにもかかわらず、2つの力のギャップは想像を超えて大きいのである。しかし、そういうレベルではなく、大学教養レベルの物理学としては、重力と電磁気力は同じ形式で書くことが可能なのである(そんなことをしている本は1冊もないが)。

万有引力と電気力の記述形式が違う理由は、もちろん、似ているにもかかわらず、決定的に違っている点もあるからである(ただし、この違いはあくまで数量的なものである。何度も強調するが、法則としての形はまったく同じである)。

まず、我々人間の尺度で測ると、万有引力はきわめて小さな力であるのに対して、電気力はきわめて大きな力である。

質量の単位をキログラム、電気量の単位をクーロンとした場合、それぞれの力の比例定数の大きさは、おおよそ、

$$G = 6.7 \times 10^{-11} [\text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2]$$

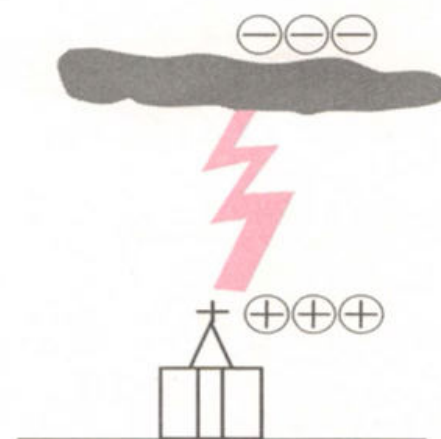
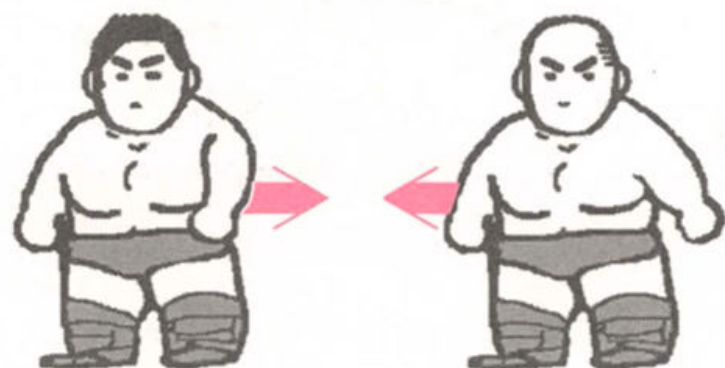
$$k = 9.0 \times 10^9 [\text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2]$$

である。単位系の取り方によって、この値はどのようにも変わるから、絶対的なものと考えてはいけませんが、とりあえずそのまま比較すれば、20桁もちがう。

20 桁も違う。

宇宙空間で 1Kg の 2 つの玉を 1m
離して置くと約 1 日後に衝突する

図1-2



万有引力は小さすぎて検知できない。 わずかな電気でも破壊的である。

現実の生活において、我々は自分の体重をしっかりと把握できるが、それは万有引力の相手が地球という巨大な天体だからである。いかに巨漢であっても、2人のプロレスラーの間に働く万有引力など、検知のしようもない。

それに対して、電気力は巨大である。地上と雲の間にあるわずかな電気ですえ、雷のはげしいエネルギーを誘発する。20桁の違いはこうして実感できるだろう。

万有引力と電気力を記述する形式の決定的な違いは、このあまりに大きい力の差に由来するのである(あとで述べる磁気作用はその典型である)。

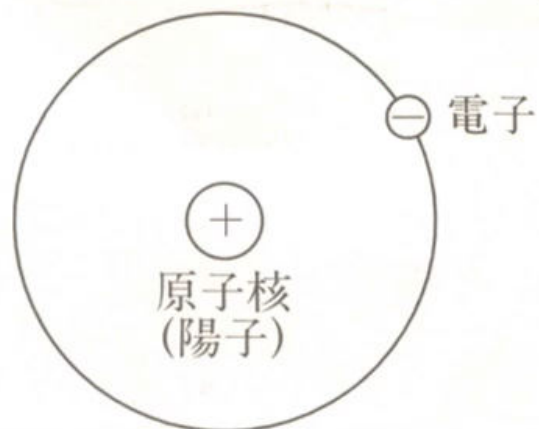
●この世は電気できている

万有引力と電気力の2番目の大きな違いは、電気にはプラスとマイナスがあるという点である。プラスとマイナスの電気は引き合い、プラスとプラス、マイナスとマイナスでは反発し合うということは、もちろん周知の事実である。すなわち、万有引力には文字通り引力しかないが、電気力には引力と斥力がある。

このことが、我々の生活を豊かなものにしている。我々の周りで起こるさまざまな日常的現象は、生命現象や化学反応をその筆頭として、ほとんどすべて電気力の結果である。

それでは、そのような現象を引き起こす電気の正体は何なのか。このことは、ぜひ知っておいて頂きたい。

図1-3 ●原子の構造(電子1個の場合は、水素原子)。



原子核の+と電子の-は
完全に打ち消し合う。
(本当は、電子は原子核の周りに
雲のように広がって存在する。)

高校物理で、すべての物質は原子でできていること、またその原子がプラスの電気をもった**原子核**とマイナスの電気をもった**電子**からなることを学ばれたであろう。

我々の身の周りで起こる電気現象は、すべて、この原子核のプラスと電子のマイナスの電気が引き起こすものである(とくに電子の方が重要である)。

通常、原子核のプラスと電子のマイナスの電気量の大きさはぴったり同じなので(同じでないものがイオンである)、1個の原子を離れたところから見ると、プラス・マイナス・ゼロで電気をもつようには見えない。これが、電気力がとほうもない大きさなのに、日々の生活で我々がそのような破壊的な力に出会わず平和に暮らせる理由である(雷はそのわずかなずれで生じる)。

それゆえ、本書で登場する点電荷というのは、具体的には電子や原子核の構成要素である陽子(あるいはプラスイオン)を想像しておけばよい。電気とは、それ以上でも以下でもない、電子や陽子そのものなのである。

ちなみに、電子や陽子1個がもつ電気量の大きさは(電気素量と呼ばれるが)、およそ 1.6×10^{-19} [C] である。

る

●「場」という考え方に慣れよう

電気にはプラスとマイナスがあること、また重力と比べて桁はずれに大きな力であることが、電磁気現象の記述に「場」という独特の考え方をもちこんだ。

高校物理では、クーロンの法則から電界というものを定義する。つまり、クーロンの法則における2つの点電荷の一方を +1 クーロンとし、

その +1 クーロンの点電荷が他方から受ける力を電界 E としたのだった。

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \longrightarrow E = k \frac{q}{r^2}$$

この「電界」のことを，基礎物理では「電場」と呼ぶ。もちろん，電場と電界はまったく同じものである。どちらを使うかは，たんなる習慣にすぎない。

その +1 クーロンの点電荷が他方から受ける力を電界 E としたのだった。

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \rightarrow E = k \frac{q}{r^2}$$

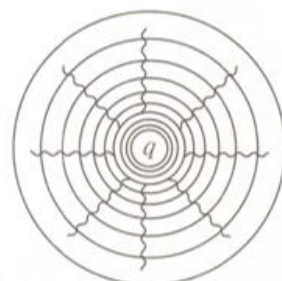
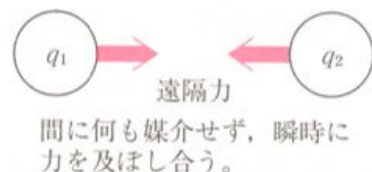
この「電界」のことを、基礎物理では「電場」と呼ぶ。もちろん、電場と電界はまったく同じものである。どちらを使うかは、たんなる習慣にすぎない。

さて、クーロンの法則ですべてが言い尽くされているはずなのに、なぜ電場というものをわざわざ定義するのであろうか？

それは次のような事情による。

クーロンの法則だけを見ていると、電気力は(重力と同じく)遠隔力であるように見える。つまり、2つの点電荷は、間に何も介さずに、瞬時に力を及ぼし合う。さらにいえば、1つの点電荷があるだけでは、クーロン力はどこにも見えてこない。2つ以上の点電荷があって、はじめて力が生じるのである。

図1-4



近接力
何かが時間をかけて伝わっていく = 場

しかし、本書の最後の方で分かることであるが、本当は電気力は(そして重力も)、何かが順次伝播していく近接力なのである。ということは、たとえ真空中であったとしても、点電荷が存在すると、その周囲には力を伝播させる「何か」が存在しなければならないことになる。(真実が何であるかは神のみぞ知ることであるが)その力を伝播させる「何か」を、一般に「場」と呼ぶことにするのである。クーロン力によって生じる場は電場であり、このあと述べる電流によって生じる場は磁場である。

実用面からいっても、場という考え方は便利である。電気力の場合、

プラスの電気かマイナスの電気かで、働く力の向きがまったく逆になるから、たとえばエネルギーを記述するときにも、その都度、プラスかマイナスかを配慮しなければならない。それに対して、ある点電荷はその周囲にこれこれの電位をつくるとしておけば、プラス・マイナスをいちいち考えなくてよい。

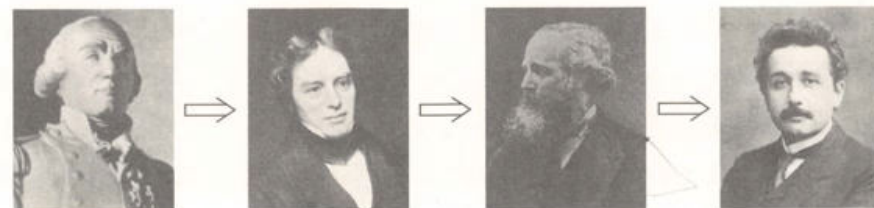
こうして、電磁気学からはじまった場という考え方は次第に一般的になり、現代の物理学では、**場の理論**こそが物理の土台と考えられているのである。

●磁気とは何かを明確にイメージしておこう

磁気は不思議な現象である。1831年にファラデーが電磁誘導の法則を発見するまでは、電流が磁場をつくることは知られていたが、電気力と磁気力の本質的な関係はよく分からなかった。にもかかわらず、電気力と磁気力には似たところがあり(たとえば電気は +, - に対し、磁気には S, N があるように)、2つの力には何らかの関係があるように見えた。

このような電気力に対する磁気力の存在は、万有引力の法則には見られない。そしてそのことが、電磁気学を複雑なものにしている最大の理由でもある。

図1-5 ●電磁気学をつくり完成させた人々(その他多数)。



クーロン

ファラデー

マクスウェル

アインシュタイン

1864年、電磁気現象はマクスウェルによって完璧に統一され、今日でも100パーセント通用する見事な体系として輝いているが、それでもなお、重力現象と対応しないなど残ったままであった。

磁気現象のなぞが完全に解かれたのは、1905年のアインシュタインの**相対性理論**によってであった。一言でいえば、磁気現象は、電気力の相対論的効果の結果なのである。

相対性理論とは、静止している座標系に対して運動している座標系では、時間と空間の尺度が異なってくるという理論である。力やエネルギーといった物理量は、すべて時間と空間の次元を含んでいるから、運動する座標系ではすべての物理量を見直さなければならなくなる。

それゆえ、ニュートンの運動方程式も万有引力の法則も、厳密に言えば相対性理論に則って書き直されなければならない。しかし、我々の日常生活では、運動する物体の速さは、光速に比べて十分遅いので、これらの修正が必要ないのである。光速に近い粒子や、ブラックホールのような強い重力を扱うときにはじめて相対論的力学を適用することになる。

一方、電気力での相対論的效果はどうであるかという、基本法則の形はまったく同じであるにもかかわらず、電気力が巨大な力であるということと、引力と斥力の両方があるという事実によって、我々の日常の中にその効果が現れてくるのである。

たとえば、電流の流れていない2本の導線を近づけても、その間にいかなる力も観測することはできない。それは、導線の中には莫大な電荷量が存在するにもかかわらず、原子のスケールにおいて、そのプラスとマイナスが打ち消し合っているため、クーロン力の合計が0となってしまうからである。

ところが、いったん導線に電流が流れはじめると、この2本の導線は引っ張り合ったり退け合ったりする磁気力を受ける。それは、導線の中のプラスの電荷である原子核は静止しているが、マイナスの電子が電流として移動するからである。つまり、運動している電子は(光速に比べて十分に遅いにもかかわらず)、運動するというそのことによって、相対論的に修正されたクーロン力を及ぼすからである。

じつは、相対性理論は、電磁気学を母体として生まれた理論なのである。それゆえ、マクスウェルの電磁気理論は、ニュートン力学と違って、相対論的修正を加える必要がない。磁気現象を取り込むことによって、最初から相対論的效果が織り込まれているからである。

以上のポイントを押さえておけば、電気力と磁気力の違いを、すっかりしたイメージで捉えることができるだろう。