

あなたと恋する物理学
電磁気学
Chapter 1 電磁気学の基礎

$$y_i = \mu$$

2019年9月15日

どうすれば、理解できるのだろう。

どうすれば、理解してもらえるのだろう。

『そこは高校生がやるところじゃないよ』

他にやることはもちろんある。

『ごめん、物理得意じゃないから』

私だって、わかっているわけじゃない。

『これ覚えないと受験で困るよ』

そういうことじゃない。

『そんなことを気にしなくていい』

重要なんだ。私にとって。

私はただ知りたいだけなのだ。もっと考えたいだけなのだ。

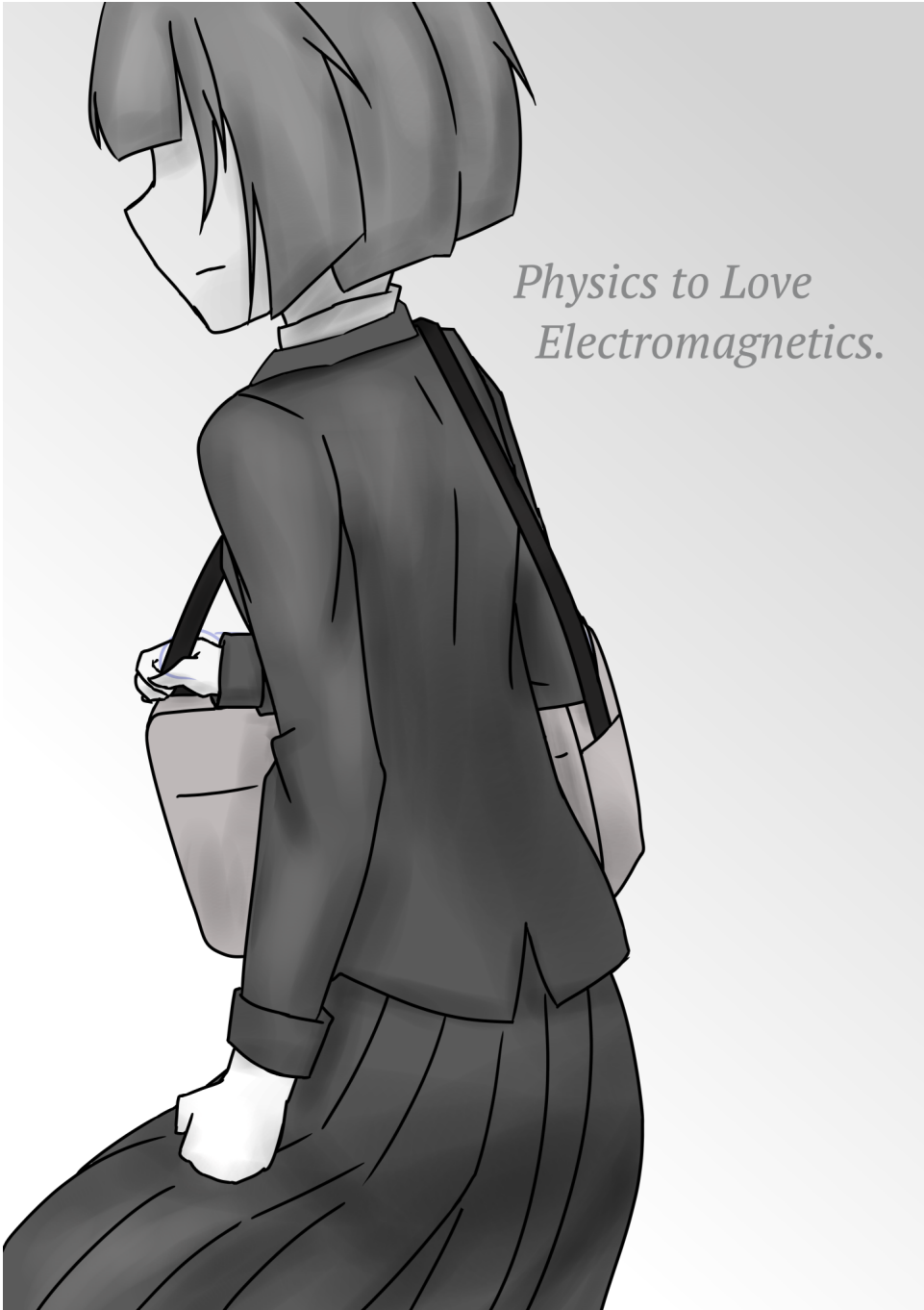
ただそれだけで終わりたくない。

もっと知りたい。

もっと……物理を知りたい。

だから……私は、

あなたと、もっと。



0 電場

0.1 逆2乗則

2人のシャーペンが紙を擦る。その音だけが物理室に響いていた。横に座る彼女をちら見しながら、私は話しかけるタイミングを伺っていた。

目の前にある1つの数式と、彼女の横顔を交互に見ながら。

「あのさ、あかり」

私は勇気を出して、声をかけた。

「ん、どうしたの、あおい」

彼女はそう言ってこちらを向いた。

「ちょっと見てもらいたい式があるんだけどさ……」

私は教科書を彼女に見せる。彼女もまた、私の方へ体を乗り出してくる。

$$F = k \frac{qQ}{r^2} \quad (0.1)$$

……それが、私の指差した式だった。

「ああ、物理？」

「そう。それでさ……なんで、ここって r^2 なの？」

「『なんで』って……どういうこと？」

「いや、直感的にはさ、プラス電荷とプラス電荷があったときに、近づくほど斥力は強くなっていくことはわかるよ？ でもさ、なんで2乗なのかなって。弱くなるんだったら r の1乗でも3乗でも……いいんじゃない？」

「……でも、実験事実として、 r^2 に反比例する。ということが知られているんでしょ。……事実だから仕方ないんじゃない？」

彼女は、ある意味で私の期待通りの答えを返した。事実だから反論できない。確かにそうさ。数々の実験からこの法則は認められているのだろう。でも、そうじゃなくて……

「いや、実験的な説明じゃなくて……理論的な説明はないのかな、って」

「……ふむ」

彼女は右手を口元に当てる。そんな彼女を私は上目遣いで見る。じっと式を見つめるその瞳は、何を考えているのだろうか。私とは全く違う世界が見えているのだろうか。

「ほら！ あかりって数学すごくできるじゃん！ 何か知っていたりしない？」

高校生には無理かもしれない。けれど、大学の数学なら、何か見つけられるのではないかな。私が彼女に寄せている期待はそれなのだ。

「……今の所は思いつかない。でも、急にどうして？」

「まあ、ふと思っただけなんだけどさ……そうだ。万有引力の式ってあったじゃん？」

私は教科書のページを戻り、もう一つの式を指差す。

$$F = G \frac{mM}{r^2} \quad (0.2)$$

「これって、クーロンの法則と同じ式してるよね！」

「……確かに。似た構造があるのかも。どちらもベクトルだし……」

「あ、そっか！ 力ってベクトルだ……！ ねえ、その辺から何か、わかったりしない？」

彼女はしばらく考えたのちに、口を開いた。

「……わかるかもしれない。けれど、ベクトルの微分積分が必要になる。高校の数学じゃ無理」

そうか。やはりそうなのか。……高校生が理解するのは、無理なのか。

やはり、暗記するしかないのか。

『なぜ』と問うことは、許されないのか。

私には。

「……………」

いや、そんなはずはない。科学は疑問から生まれているはずだ。なぜ逆2乗なのか？
そう問うた人はこれまでも大勢いたはずだ。少数派かもしれないけれど、物理学の中でその疑問はあるはずだ。私だって疑問に思ったことを、ほかの誰も考えていないとは、思えない。

だって、そうじゃない？ こんなに似ている式があるんだ。関係がないと考えるほうが……おかしい。

「……？ あおい？」

「ねえ、あかり」

理解しないままで終われない。理解しきれなくてもいい。気が済むまで、議論したい。本当は何があるのか。考えたい。

そのために……

「あかりの力を貸して！ お願い！ やっぱり、私は気になる！ もっと……物理を、知りたい！」

私は彼女に……あかりに、頼み込んだ。

ただ、物理を知りたい。学びたいという一心で。

そうして、私の物理学は始まった。

0.2 電場と力

私の名前は渡辺 葵^{わたなべあおい}。今をときめく高校3年生。受験生だ。一応、志望校は決めている。この周辺では一番有名な大学だ。それだけあって競争率も当然高い。だから、勉強しなければならない。つらいことではあるけれど。

幸いなことに、私には一緒に勉強をしてくれる人がいる。それが、いま一緒に廊下を歩いているロングヘアの美少女！ 関口灯理^{せきぐちあかり}だ。あかりは数学での学年主席！ 大学数学にも手を出しており、もはや心配することは何もない、らしい。

そんなあかりと、私たちは毎日、放課後は物理室に行き、勉強をするようにしている。基本的には、授業の復習や、テストの答え合わせなど……だけれど。

「ん……いいけど、私、物理そんな得意じゃないよ」

「嘘だあ。私より点数とってるくせにっ」

あかりは謙遜するけれど、私よりもはるかに頭がいい。元から知識があるというのが大きいのだろうけれど、何が必要で何が不必要なのか、判断する力が優れているのだ。私のすぐ隣にいる友達だけれど、憧れの対象だ。

「点数はともかく……ええと、逆2乗だっけ？ 力が……だったら、電場を考える必要があるんじゃない？」

「電場……というと、電荷が受ける力の場か。確かこんな式だったよね」

私は教壇に登り、黒板に式を書く。

$$F = qE \quad (0.3)$$

「ええと……電気量 q を持つ電荷が、電場が E の位置にいるときに受ける力 F ……の関係、だよな？」

「合ってる。より正確に書くなら、こういう風にベクトルで表す」

あかりも登壇し、私の式に書き足す。

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \quad (0.4)$$

「あ、ベクトルか！ そうだったそうだった。……ん、となると、空間の各点各点にベクトルがあるってこと？」

\mathbf{E} はベクトルだ……電場の強さと方向を表している。ただし、空間のどの点でも同じベクトルではない。電荷に近いところの方が強い力が働く。電場も強くなるのだ。

「そう。ベクトル場……そうだな、性質としては重ね合わせができること……あとは、プラスから出て、マイナスに吸い込まれる。ということくらい？」

「うーん、私もそのくらいしかわかんないなあ。重ね合わせるのは力の合成と関わって来るんだよね？」

私はあかりに確認する。「もちろん」という返答を受け取ったあと、この電場 E のことについて考える。

……電気量 q の電荷は、電荷 q とも呼ばれるんだった。そして、電場があった時に、力を受ける……つまり、この力には『電荷』と『電場』の2つが必要だ。

「電場の正体がわかれば、なんで逆2乗なのかってこともわかるのかな？」

「……そうだね。そういう式があったはず」

「あ、点電荷の作る電場の式がこれだよ！」

$$E = k \frac{Q}{r^2} \quad (0.5)$$

「これって、電荷 Q の周りに、こう……ばあーって、電場のベクトルが放射状に出てるってことだよ？」

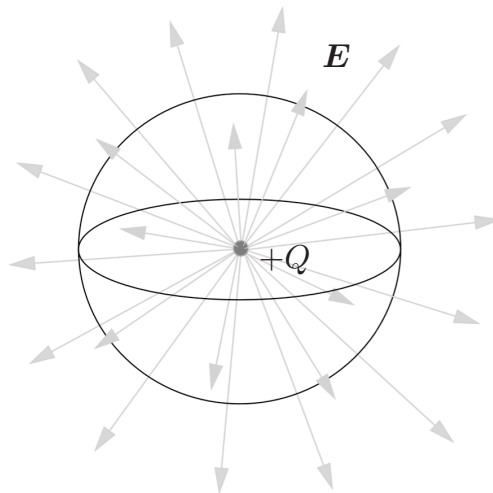


図1 点電荷の作る電場

私は黒板に図を描きながら説明する。絵心のかけらもないけど……

「そういうことだね。『力が逆2乗なのは、そもそも電場が逆2乗だから』……という説明はできそう」

「ああ、確かに！ 電場の性質が力に表れているんだ！」

電荷と電場がある。電氣的な力は、その電場の性質を反映したものなのだ。

0.3 電気力線とガウスの法則

「となると、電場を知るために何が必要か……」

あかりはチョークを置き、しばらく考える。何か、いいものがないか……私は頭の中を探る。黒板に書いた図を見る。中心にある電荷……点電荷から、ばあーっと広がっていく……電場が広がる……線？

「あ！ 電気力線だ！」

「っと、どうしたのあおい」

「電気力線ってあったじゃん！ 正電荷から出てきて、負電荷へ向かうやつ！ 交わらない。折れない。枝分かれしないってやつ！」

降段し、教科書を取り、登壇して黒板の前に戻って来る。ページをめくり電気力線の項目を探す。そこには『電荷 Q から $4\pi kQ$ 本の電気力線が出て来る』とあった。

「なるほど…… $4\pi kQ$ は整数じゃないけど、それはいいとして……」

「ん？ いや、あかりちょっと待って……なんでそんな数なのかな？」

$4\pi kQ$ ……なんとも中途半端な数だ。あかりも考え込む。そしてあかりは言う。

「球の表面積は $4\pi r^2$ ……電気力線の本数を表面積で割れば電場の大きさになる」

$$\frac{4\pi kQ}{4\pi r^2} = k \frac{Q}{r^2} \quad (0.6)$$

「あ……本当だ！ えっと……電気力線の本数を、球の表面積で割った！ つまり面の密度ってことだ！ ……あ！ そっか、そう考えればいいんだ！ 光線と同じだよ！」

私は黒板の絵に、球を追加する。

「広がっていく光って、距離が2倍、3倍になるにつれて……明るさが1/4倍、1/9倍になるじゃない！？ ええと……この、面の角度、っていうか……」

「立体角。ある点から見込む角度のこと。確かに、立体角あたりの電気力線の本数は同じになる」

「そう、そういうこと！ 立体角かあ……。まあ、それはいいとして『電場の強さは電気力線の密度』ってのはどうかな！？」

自信満々に私はあかりに言う。しかし、あかりの表情は訝しげだった。

「どう、ねえ……どうと言われても……判断がつかないかな。たった1つの例しか考えていない、一般性が保証されてないことを考えるのは……でも発見的にはありなのか……」

ぶつぶつ、とあかりは呟く。時々、あかりは1人で考え込むことがある。その時にあかりはあかりの世界にどっぷりと嵌ってしまって、しばらく帰ってこない。

「もし……もし、全ての電荷と電場の関係がそういったものであるなら……多くの電荷が

集まっても、その法則は変わらず成り立つ」

「えーと……うん、そうだね！ プラスとマイナスで打ち消しあったり……プラス同士マイナス同士だったら……ぐにゃんって曲がって……」

「だったら、あおいの考えでいいかもしれない」

と、あかりは私の方を向いた。

私の考え……つまり、電気力線の密度が電場の強さということ。

確かにあかりの言う通り、私は1つの例しか見てないから本当にこの考えでいいのかわからない。けれど、電荷というのが電子や陽子などの、点とみなせるほど小さな粒子なら……それぞれの作る電場を足し合わせることで、ガウスの法則を確かめることはできるのではないだろうか。

「となると、クーロン力の逆2乗則は、この世界が3次元空間だからという事実が根底にある。この世界が2次元だったら、電場の強さは r^2 ではなく r に反比例していたはず」

「あ、そうかも！ 円周の長さが $2\pi r$ だからだよな！ なるほどねえ」

そうか。この世界は3次元！ 3次元では球の表面積は半径の2乗に比例する。電場の大きさは電気力線の本数を面積で割ったもの。だから、逆2乗！

「ありがとうあかり！ 本当にありがとう！」

「どういたしまして……と言っても、問題を言い換えたただけで、特に何か進展したわけではないけどね……」

0.4 電場は存在するか

「あおい。もう8時だよ。そろそろ帰らない？」

というあかりの声で、私は我に返った。『電場の大きさは電気力線の密度』ということ以上に話は広がらず、少し遅れて、いつも通りの受験勉強をやった。私は今日は英語の単語をノートに書きまくっていた。暗記の作業は、いつも時間が足りなくなる。

「もうそんな時間か。うんわかった。ちょっと待ってて」

私は席を立ち、少し伸びをする。窓の外は真っ暗。もうすぐ梅雨だから、これから雨も降り出すんだろうなと考えると、少し憂鬱になる。

あかりはもう荷物をまとめている。私も荷物をまとめよう。

教室の電気を消して、廊下に出る。誰もいない廊下に二人きり、少し肌寒い気はするけれど、もう慣れたものだ。梅雨が明けたら夏だし、それまでの辛抱か。梅雨時期はジメジメするからあんまり好きじゃないんだよなー。

「……あおい」

「ん？ どうかした？ あかり」

下足棟へ続く渡り廊下で、隣を歩くあかりが私に話しかけてくる。

「あおいの話で思ったんだけど、場って……何？」

という、質問だった。

「力、ってものはなんとなくわかる。でも……電場とか磁場とか、話は聞くけど……それって、本当に存在するの？」

あかりは私にそう尋ねてきた。必要最低限の明かりしか灯っていない校舎は昼間の学校とは違い、まるで別の場所にいるかのようだった。

「『場』が存在するか、かぁ……」

私はあかりの質問にすぐに答えることができなかった。

物体が空間の中で運動する。その空間の中には、場と呼ばれるものがあり、そして運動はその場の影響を受ける。そうやって力を受けるのだ、ということは知っている……つもりだ。

しかし、その『場』が存在するかどうかは……よく分からない。

「あくまでも、その存在を信じてるってこと……なのかな。それを信じて、仮定した方が物理は作りやすい……んじゃない？」

「場の存在を……信じてる？」

あかりは私の方を見た。あかりの表情はわかりづらいが、私の言ったことを疑っているようだ。物理学……科学にあるまじき態度だということはなんとなくわかる。説明できないことに対して蓋をしているように感じたのだろう。

「でも、最終的には何かを信じないと話ができない気がする。物理って、現象を説明しようって学問じゃん？ そのための道具として使うのはいいんじゃないかなあ……でも、電荷が遠くの電荷に影響を与えるのは間違いなさそう。電荷は周囲の電荷に影響を与える」

「舞台装置、のようなもの？」

「そう！ そして、その舞台装置は、かなり遠くまで作り出すことができる。だから、接していなくても力が働いているように見える……それが、遠隔作用。電荷が離れたり、近づいたり。方位磁石が北を向いたりするのも……魔法みたいだったものは、こういう『場』ってもので説明できるようになった。もちろん、万有引力も。……それって、ただ数式をいじった以上の意味があるんだよ。そう……物理は、世界の見方をはっきりと変えるんだよ。空間は、空っぽじゃないんだよ」

「……空間は、空っぽじゃない」

「うん！ 電場って言えるのかはわかんないけど、『何か』はあるはず……だと思う！」

あかりは「だから、それは何？」と、悩める私をさらに悩ませるのだった。

0.5 電磁気学到場は必要か

「場……って、本当、なんだろう……」

私は家に帰って風呂に入った。水面が音とともに揺れている。

電場、磁場、重力場。

あかりは「ああ、物理は逆に、それを追い求めるのか」と言って納得したようだけれど……まあ、あかりが納得したようでもいいか。

「うーん……場の存在……」

ちゃぶん、ちゃぶん。と、水面を揺らす。水面が、揺れる。その波が浴槽の端に辿り着く。

多分、こういう風な水面の揺れが、場のイメージそのものなんだろう。手が波の原因になっているけれど、その影響は手から離れたところに伝わる。

つまり……この水のように。このお湯のように。空間は何かで満たされているのだろうか？ 電場として力を伝えるものが……。

「……それが、エーテル？ ……でも、エーテルって存在しないんだったよね？」

エーテルがなければ、電場って、何だ？ ただの『場』として、エーテルなしで容認する……

「……でも、そう考えたほうがいい。そう仮定したほうが都合がいい……それは歴史が示している」

クーロンの法則が発見されたのは、1800年代の前半らしい。およそ200年前。その200年の間、電磁気現象はより身近なものとなった。その中で、電磁気に関する理解もかなり動乱があっただろう。この理論が正しいのか、どの理論が正しいのか。

その中で生き残ったのが現代の理論なのだ。

「……この世界には、場が存在する」

という、仮定。この仮定を置いた段階から、現代の電磁気学はスタートしている。そこになぜか？ と問うのは自由だ。しかし、問いかけるのであれば、この長い歴史よりも説得力のある理屈を持ってこなければいけない。現代はこの場の考え方が主流で、わかりやすいと言われているだけ。他の理論を否定してはいないが、この理論が否定される謂れも今の所はない。

「もし、場を考えなかったら……」

どうなるのだろうか。場を使うことで、遠隔作用でなく近接作用として電磁気の力が解釈されるようになったんだ。使わなければ、遠隔作用のまま……

「うーん……」

遠隔作用のまま、何の問題があるのか。

場は、本当に必要なのか？

「……一応、武器にはなるのか。電気力線もあるし」

まあいい、今の所はそう考える。それだけだ。都合が悪くなれば、その都度考えればいいのだ。今はひとまず、電場の存在を認めるとしよう。

「んー、と。ああ、そういえば、あかりはあんまり驚かなかったよなあ」

『この世界には場が存在する』。それはいいとして、その次に『電場中の電荷は力を受ける』ことについて。『重力場中の物体は重力を受ける』こともそうなのだが……肝心なのは『場の中の何かが力を受ける』ことだ。

場はただ単体でそこにあるのではない。力という形で現れる。場の中に物体があることでその物体は力を受ける。式で書けば $F = qE$ だ。 F も E もベクトルだから、ただ単に q を掛けただけでも読めるけれど……でも、そうじゃない。

「……物理学は、数学ではない」

そもそも根本が違うのだ。物理学は……人が、世界に挑んだ証。世界を数学を使って記述しようとした、強い心と信念のもとで発展した学問だ。どう記述すれば現象を説明できるのか。試行錯誤と血と汗の結晶なのだ。

おそらく、私と、そしてあかりのような疑問をした人はいっぱいいたはずだ。

その人たちがたくさん、一生懸命考えたからいまの物理がある……に違いない。

『電場に電荷を置くと、その電荷は力を受ける』…… $F = qE$ 。この1つの式のために、どれだけの人が活躍したのだろうか。

「みんな、悩んだのかな……こんな風に」

そして、悟るのだ。もっと勉強しなければ、と。

私は風呂から上がることにした。