Physics Challenge 2009 at Tsukuba

物理チャレンジ弐零零九 於筑波

真理窮理

MarieCurie

八月参日号

2009/08/03

理論問題にチャレンジ

理論問題第１問　速報

第１問（80点）

温度が高いところから低いところへの熱の移動には，伝導，対流，放射の３つの形態がある。このうち、放射による熱の移動とは，電磁波が運ぶエネルギーの流れのことである。電磁波は真空中でも伝わるので，太陽エネルギーが地球に伝えられるのもこの流れによる。

太陽に限らず，すべての物体は，その温度が絶対零度でない限り，その表面から電磁波を出している。温度が低い物体は波長が長く目に見えない電磁波を出す。700°C 前後の物体は赤い光を出す。さらに温度が高くなると，しだいに青い光も出すようになり，その結果，表面温度が数千度の太陽はすべての可視光領域の光が混ざった白い光を出している。このように温度によって決まるエネルギーの放射を熱放射という。

物体の熱放射のモデルとして，黒体放射あるいは空洞放射と呼ばれるものがあり，量子物理学の誕生に寄与した。この問題では，太陽と地球から出る放射はすべて黒体放射と同じ性質を持つものとする。

この黒体放射の理論によると，温度（絶対温度）が T の物体の面積 S の部分から単位時間に放射されるエネルギーは S に比例するので，これを $I \times S$ と表すことにしよう。すると，I はその物体の温度 T のみに依存し，T^4 に比例する。以上をまとめると，温度 T の物体の表面の面積 S の部分から放射されるエネルギーは単位時間に

$$IS = \sigma T^4 S$$

となる。右辺の σ はシグマと読み，$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\mathrm{W/(m^2K^4)}$ は，シュテファン-ボルツマン定数と呼ばれる。

図 1:

[I]

太陽から放射状に出た太陽光も，地球の付近では，図１のようにほぼ平行光線になっている。したがって，地球の半径を R_E として（以下で添字 E は地球に関する量であることを表す），斜線で示した半径が R_E の円を通る光のみが地球を照射する。地球の公転軌道上にあって太陽光

【OBによる問題講評】

第5回物理チャレンジ，記念すべき先頭を飾ったのは，黒体放射を用いて地球のエネルギー収支を考えるという問題であった．

まず冒頭に書かれているシュテファン・ボルツマンの法則の説明をきちんと理解できたかどうかが鍵だっただろう．物理チャレンジでは，このように普段高校では出てこない概念を，その場の誘導で理解して，使いこなすということが要求される．つまり，よく考えれば分かるようになっているのである．この点で，第１問は物理チャレンジとして標準的な問題であったと思う．

後半までたどり着いたチャレンジャーは，このような簡単なモデルから地球の温度を見積もれてしまうことに，物理の応用力を感じたことだろう．

理論問題　出題者インタビュー１

理論問題第1問出題者の川村先生に
インタビューしました.

Q. 第1問についてです. この問題の出題の経緯を教えてください.
A. 温室効果というのはよく耳にすることです. これがどういう原理か？というのは高校生も手を動かせば分かります. 日ごろ耳にすることに物理のネタがあるのです.
　また, この問題を通して, 太陽・地球・宇宙空間がエネルギーをやり取りしているという見方も分かったでしょう.

Q. 苦心したことはありましたか？
A. 苦心したのは, 高校生の持っていない知識をなるべく使わないようにするということです. シュテファン・ボルツマンの法則は与えたものの, その他は高校生の持っている考え方で, 考えれば解けるようにしました.

－ありがとうございました.

理論問題第2問　速報

【OBによる問題講評】

- 問題には電場と磁場の問題でした。電場の概念の紹介からガウスの法則へつなげる[Ⅰ]、磁場の概念を用いて、簡単な磁場中でのコイルの運動を見る[Ⅱ]は誘導も親切で分かりやすかったのでは、と思います。（僕もいい復習になり助かりました・・・）
- [Ⅲ]は電磁誘導と自己誘導ということで、自己インダクタンスなどが出てきて難しそうに見えますが、結局は式(8)を用いれば、単振動と自由落下の計算に帰着できるはずです。
- [Ⅳ]はとても面白い話題だと感じています。（2005年に類題があったような気もしないでもないですが。）直線電流のそばの静止電荷は力を受けないが、それを電流の電荷と共に動く立場から見るとどうなるか？という問題です。誘導に従って計算していくと、電場による力と磁場による力がちょうどつりあい、こちらの系でも確かに静止していることが分かったと思います。世の中うまくできているものですね。聞くたびに感動する話です。

問1 正電荷 Q から出た電気力線が　電荷 Q を中心とする半径 r の球面をつらぬいて球の内側から外側に出て行く。球面上の電場の大きさと，半径 r の球面の表面積は $4\pi r^2$ であることを用いて，正電荷 Q から出る電気力線の総数は $\frac{Q}{\varepsilon_0}$ であることを示せ。

上の結果は，多くの点電荷が分布している場合にも，個々の点電荷とそれのつくる電場を重ね合わせることによって拡張することができる。すなわち，電気量 Q の電荷から出る電気力線の総数は $\frac{Q}{\varepsilon_0}$ に等しい（Q が負のときは $\frac{Q}{\varepsilon_0}$ 本の電気力線が電荷に入る）ということができる。これは，電場に関するガウスの法則の一つの表現である。ここで Q は点電荷であっても，ある領域に電荷がひろがって分布していてもよい。

問2 直線上に単位長さあたり λ（ラムダと読む）の電気量の電荷が一様に分布している。直線が無限に長いとすると電場 $\vec{E}$ の方向は直線に垂直で直線を軸として軸のまわりに対称になる。図2に示すように直線を中心として長さ L の円柱状の領域を考える。円柱の半径を r とすると，円柱の側面を横切る電気力線の総数はいくらになるか。円柱の表面における電場の大きさ E を用いて表せ。また円柱の中に含まれる電荷はいくらか。λ を用いて表せ。

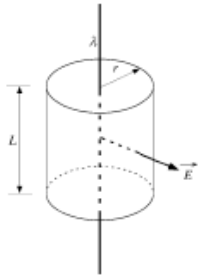

図 2:

問3 問2の結果とガウスの法則「電気量 Q の電荷からでる電気力線の総数は $\frac{Q}{\varepsilon_0}$ に等しい」を用いて，直線から距離 r の位置での電場の大きさ E を求めよ。

[II]

【電流と磁場】運動する荷電粒子に（重力および電場からの力以外の）力がはたらくような空間を磁場（磁界）という。磁場を特徴づける量として磁束密度 $\vec{B}$ というベクトルがある。

電気力線と同様に，磁場のようすを表すものに磁束線というものがある。磁束線上の各点での接線の向きがその点での磁場の向きを表す。また，磁束線は，それに垂直な単位面積の平面を通過する磁束線の数がそこでの磁束密度になるように描かれる。

理論問題　出題者インタビュー２

理論問題第2問について、波田野先生にインタビューしました。

1. 3番では力学と電気、4番では電気と磁気という、高校までの教育の過程では別々に習う分野が相互に関連しているということを、問題を通じて実感してほしかった。
2. 実はこれはもともと2つの問題だったのを1つにしました。他の先生が作っていたのと問題がかぶっていたけど、両方とも基礎から深いところまで考察させる問題だったので、いっそのこと一緒にしたら、分量が多くなってしまいました(笑)。
3. 君たち学生スタッフはもう大学の物理を勉強してるからいいけど、高校では電磁気って言うと電気と磁気を独立に勉強する。ところが、これらは実は電磁気というまとまったもので、しかもそれが光は一定のスピードで走るものだっていうことを考えると、アインシュタインの相対性理論によって統一的に捉えられると考えられるんです。
4. 歴史としては電気も磁石も摩訶不思議で、お互い関係ありそうだと思ってもなかなか結びつかなかった。そこをアインシュタインが相対性理論で電気と磁気を関連付けたんです。
5. 電磁気と物体との結びつきを考えると、クーロン力であったり、電流によって生じる力があったりして、これらも方程式によって表せる。そこに相対性理論を持ち込むことによって、荷電粒子と電磁気の世界も統一的に捉えられるということをこの問題で実感できるようにしました。ちょっと全体的には難しかったかもしれないけど、おもしろかったでしょう。
6. ただ、みんな相対論に慣れていない。しかも、相対論を理解した上で考えるという訳ではなく、天下りで、走るものが縮むというローレンツ収縮をいきなり出しちゃったのでチンプンカンプンな人もいたかもしれない。その点はちょっと不親切だったかも。できなくてある意味当たり前ではある。本当に好きな人は勉強しているから分かるけど。
7. ただ、物理の自然に対する見方っていうのが、どんな見方をしてるのか、そういうにおいを感じてもらいたかった。問題自体はちょっと難しかったと思いますが、この問題が、今までの勉強が実はさらに先があって、先を行くともっと自分の頭を整理することができるんだって言うことを知るきっかけになれば、目的を果たしてると思う。

理論問題第3問　速報

第3問（90点）

[I]

「波」という言葉を聞いたとき，真っ先に思い浮かべるのが水の波であろう。この水面を伝わっていく波（水面波）はなじみの深い波ではあるが，弦を伝わる波や音波と比べ複雑である。水面波は条件によっていろいろな振る舞いをするが，ここではいくつかの仮定をもとにこの水面波の性質を調べてみよう。

水面波は，媒質の水が重力を受けながら運動することによってできる。水面波が他の波と違って複雑であるのは，媒質の周期運動が2次元的になるからである。弦を伝わる波は，媒質である弦が波の進行方向に垂直に振動する横波である。空気中を伝わる音波は，媒質である空気が波の進行方向に平行に振動する縦波である。これに対して水面波では水の運動は進行方向に平行な要素と垂直な要素を合わせもつ。

水面波は水面が上下するから，水の運動には波の進行方向に垂直な成分があることは確かである。一方，海水浴に行って浮き輪につかまって浮いてみると，波の山の部分で浮いているときは岸の方へ動かされ，波の谷の部分で浮いていると沖の方へ動かされることを経験するから，波の進行方向に平行な水の運動があることも確かである。

一般にこのような運動として考えられるのは鉛直面内のだ円軌道に沿っての運動であるが，ここではまず，水は図1のように等速円運動していると考えてみよう。ただし，波は右に向かって速さ V で進んでいるとする。

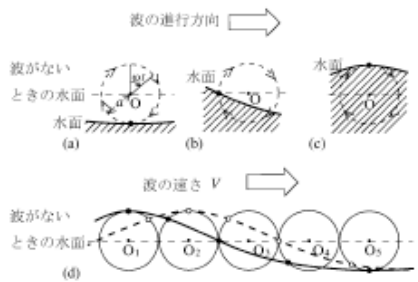

図 1:

図1(a)～(c)において，破線で示した円の中心Oは空間に固定されている。(a)は，波の谷がOの下に来たときのようすを示す。このとき，水面の最下点にあった水のかたまり（黒丸で表す）は，時間とともに円軌道に沿って時計回りに進み，やがて，(b)のようにOと同じ高さになる。周囲の水も黒丸の水のかたまりとともに上昇する。さらに時間が経つと，黒丸の水のかたまりは，(c)のようにOの真上に至り，そのときこの水のかたまりは波の山の頂上にある。

【OBによる問題講評】

理論試験最後の問題は、水面波の速さを求めることを目的とした問題でした。他の2問と比べて身近な問題であるために何が起こっているかを想像するのは簡単ではあったと思いますが、次元解析や近似計算といった慣れなければ難しい計算や、現象を観察する座標系の変換などで戸惑った人もいるかと思います。しかし、初等的な計算で波の速度を出すことができるのは、その座標変換のおかげであり、静止系のまま求めようとすると繁雑な計算になります。そのような計算なく、簡潔に波の速さを求めることができたのがこの問題のおもしろさでしょう。

問題の最後には流束の概念を使って、流体力学の法則であるベルヌーイの定理を導くという高度な問題もありましたが、初見の人でも解けるようにしようという丁寧な誘導がみられました。

余談ですが、問7と同じような手法を使えば弦に伝わる波の速さを求められます。興味のある人は考えてみたら面白いかもしれません。

理論問題　出題者インタビュー３

理論問題第3問出題者の佐貫平二先生にインタビューしました。

以下は、出題趣旨の要約です。

水の波は身近な題材であり、体験によりいろいろなことを知っているが、その現象は縦波と横波の性質を併せ持った複雑で非線形なものである。それを質を落とすことなく近似することで高校レベルで分かる手法で本質的な説明をしてみたいと思った。

また、波動現象は様々な分野に利用されている。例えば、核融合において起こる波動現象の複雑なふるまいを説明でき、それは今日のエネルギー問題に貢献できるものである。さらに、正弦波の歪んだソリトンという波を使って多くの情報を伝達する通信を実現できる。水の波はそのような複雑な波の入門的な存在であり、基本的な非線形の問題にふれてほしかった。

このような現象に興味を持ったチャレンジャーには、現象を想像できる感覚とともに数学的な技術を身につけていってほしい。

採点中…

試験終了後、早速採点が始まりました。先生方もみなさん真剣な表情です。

つくばエキスポセンター

スターリングエンジンなどおなじみの科学アイテムが勢揃い！施設の方を交えてみんなで楽しく議論しました。

フィジックスライブ

今年もフィジックスライブがやってきました。皆さん、様々なブースで、とても興味深げに見ていました。

なかには飛び入りで出し物を始めた学生スタッフもいて、全体的にとても盛り上がっていたという印象をうけました。

編集後記

インタビューのログをせっせととってました。
問題を作った先生方のこだわりがわかって
興味深かったです。

小野すみれ

試験お疲れ様でした。3日目の夜は気兼ねなく徹夜しましょう。それこそ物理チャレンジの醍醐味です。

村下湧音

先生方にインタビューさせていただくのって、めったにできない体験かもですね。楽しかったです。 小池貴之

お菓子とカップラーメンを
消費してください…

田中良樹