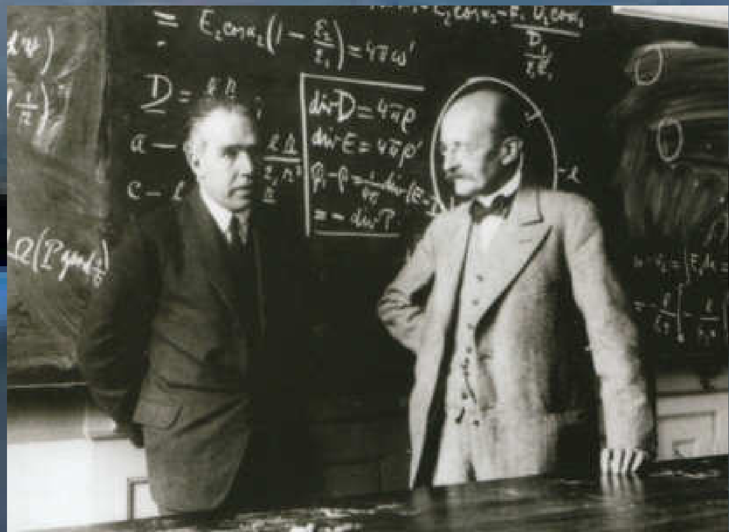
ボーアと原子



創造性の育成塾
2013夏

2013年8月2日（金）

並木雅俊

100年前の発見

ニールス・ボーア（1885～1962）
原子構造論の論文を発表（1913年7月）

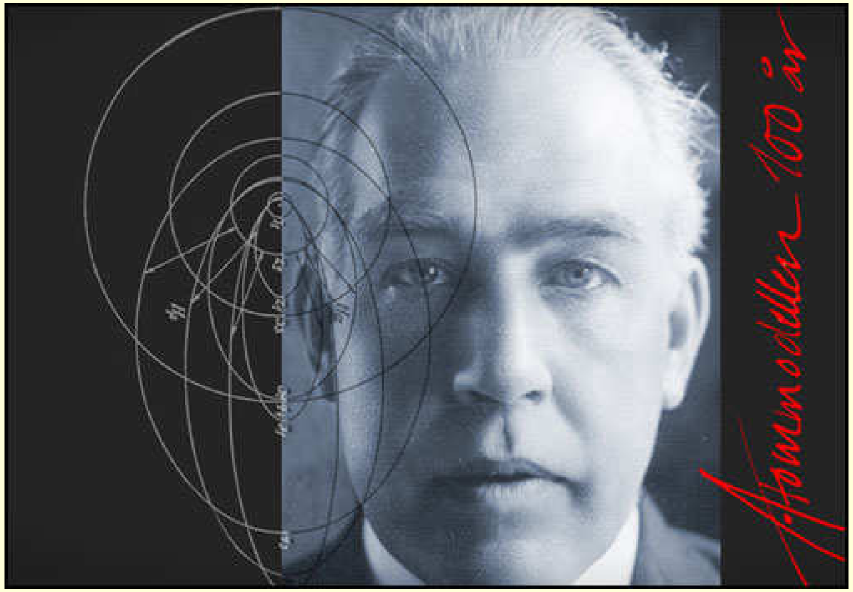
ヘンリー・モーズリー
（1887 ～ 1915）
特性X線の波長と周期律表の位置を示す原子番号(Z)との関係を見出した。

フェデリック・ソディ
（1877～1956）
放射性元素変位則発見

ボーア原子構造論100年

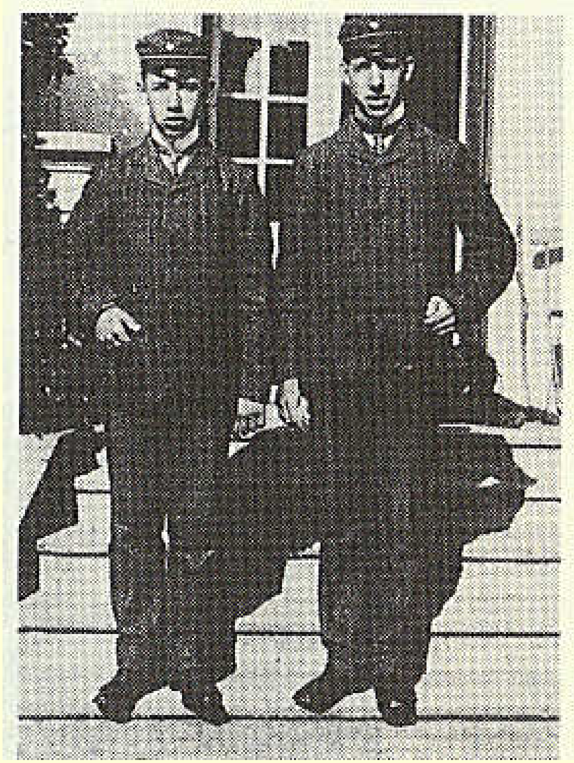
　ボーアが論文「原子および分子の構造について」を完成させたのが1913年3月6日、刊行されたのが7月である。今年（2013年）は、この100周年。

この論文は、量子論の発展において画期的な意義をもっている。

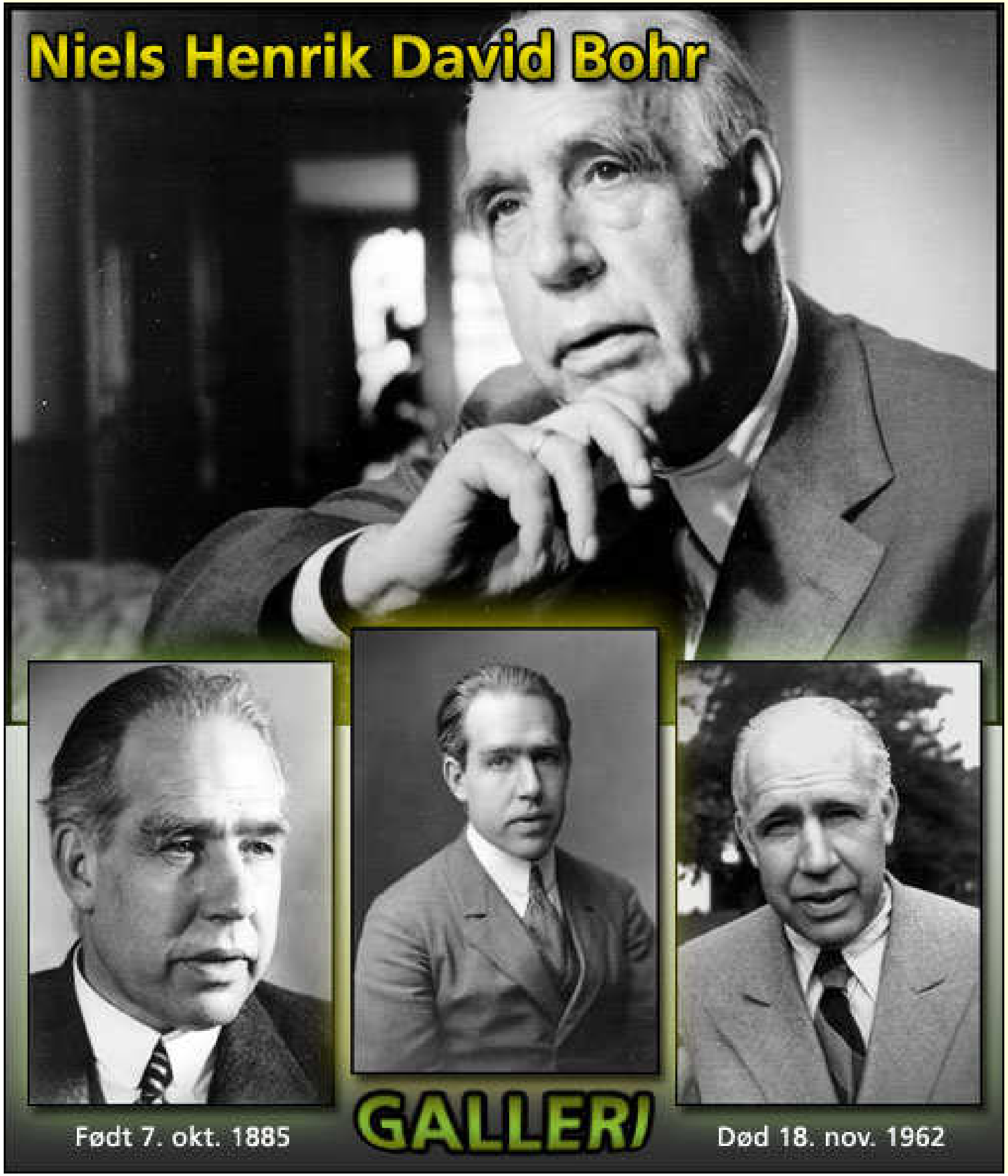


ヴァデン・デン・ブルークの仮説（1913年1月）：
中心核の電荷の大きさは周期律表における元素の順番を表す数字に等しい。

ボーアとハラル



父クリスチャンは、コペンハーゲン大学実験生理学教授。
母エレンは、デンマークの銀行家・国会議員の娘。
2歳年下のハラル（1887～1951）は、飛び入学で大学に入学、兄より1年早く博士の学位を取得し、1908年ロンドンオリンピック銀メダルとなったサッカーチームの一員であった。しかし、兄ととても仲が良かった。



ニールス・ヘンンリック・
ボーア
1885年10月7日～
1962年11月18日
デンマーク
コペンハーゲン

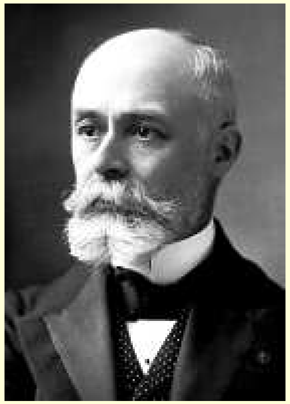
1922年度ノーベル物理学賞
「原子の構造と
その放射に関する研究」

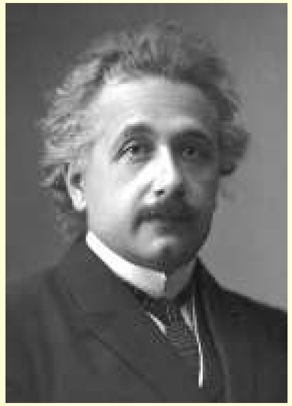
4番目の息子オーゲ・ボーア
（1922～2009）
1975年度ノーベル物理学賞
「核子の集団運動と独立粒子
運動との関係の発見およびこ
の関係に基づく原子核構造に
関する理論の開発」

物理学変革の時期

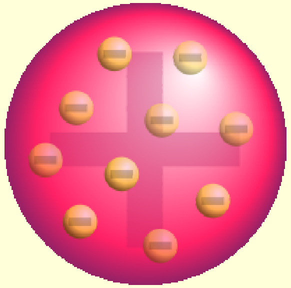
　物理学は、20世紀直前に、X線の発見(1895)、放射能の発見(1896)、電子の発見(1897)等など多くの発見と共に、本質的な課題をもった。

　プランクの量子仮説(1900)、アインシュタインの光量子仮説(1905)と相対性理論(1905)と新たな理論の登場、それに原子構造に対する考察が開始された。

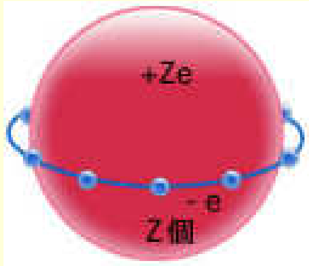



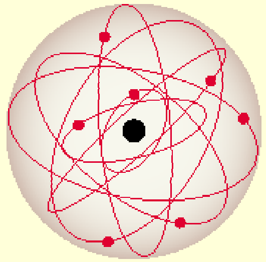
原子模型



陽球モデル



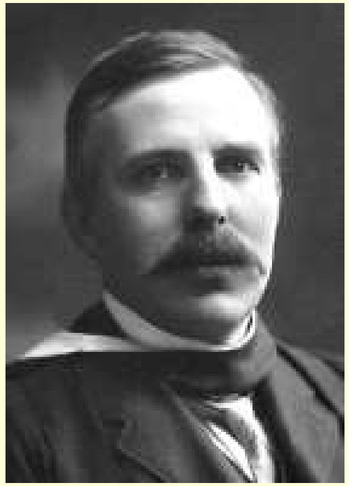
土星モデル



ラザフォード・モデル

J.J. トムソン
1856～1940

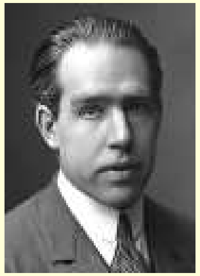
長岡半太郎
1865～1950



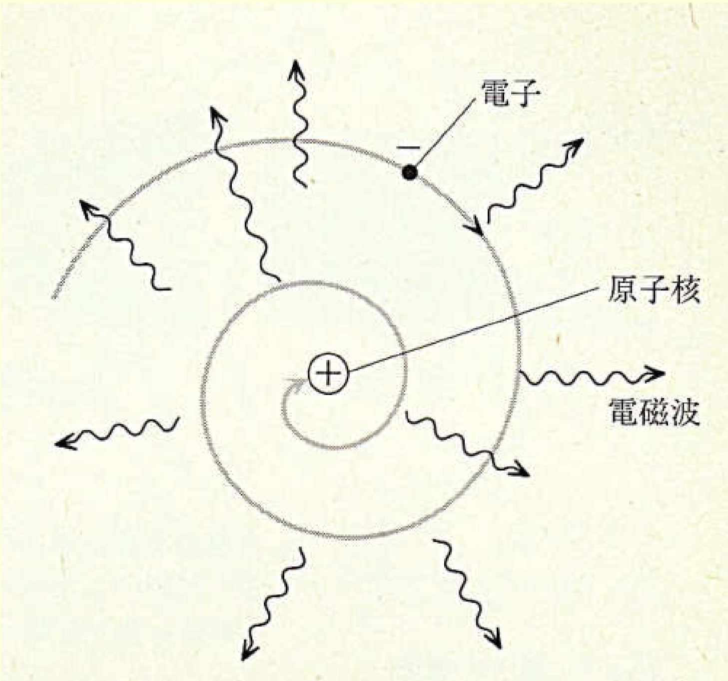
E. ラザフォード
1871～1937

ラザフォードとボーア

ボーアの先生はラザフォード、ラザフォードの先生はJ.J.トムソン。
アリストテレス、プラトン、ソクラテスのようにつながっている。



有核模型の問題点



原子内の電子は、中心にある核からの引力を受けて加速度運動している。このような場合、電子は電磁波を絶えず放出しているので、電子は連続的にエネルギーを失い、たった1.6×10^{-11}秒で、核に落ち込んでしまうはず。

水素原子のスペクトル

菫 410.2nm　藍 434.1nm　青 486.1nm　赤 656.3nm

Hα線:　波長　656.28nm
Hβ線:　波長　486.13nm
Hγ線:　波長　434.05nm
Hδ線:　波長　410.17nm

6563　　4861　　4341　　4102

これらを 3646 で割ると、

1.800　　1.333　　1.190　　1.125

となる。 これらは、

$$\frac{9}{5} \qquad \frac{4}{3} \qquad \frac{25}{21} \qquad \frac{9}{8}$$

となり、これらは、

$$\frac{3^2}{3^2-4} \qquad \frac{4^2}{4^2-4} \qquad \frac{5^2}{5^2-4} \qquad \frac{6^2}{6^2-4}$$

と表示できる。

バルマーの発見

これらは $\dfrac{n^2}{n^2-2^2}$ と表すことができる。

$$\lambda = \lambda_0 \frac{n^2}{n^2-2^2}$$

ヨハン・ヤコブ・バルマー（1825～1895）は、ドイツの大学で数学を専攻し、学位をバーゼル大学（スイス）で得た後、その地の高等女学校の教師となった。バルマーの公式を論文発表したのは60歳の時（1885年）であった。

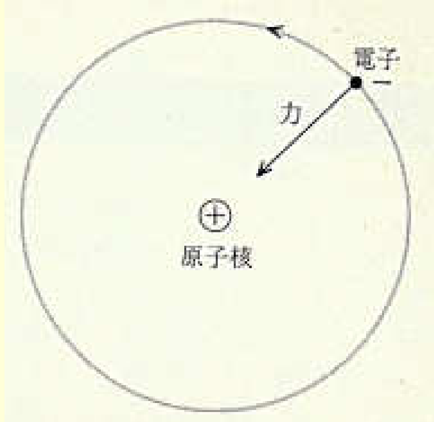
リュードベリの式

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

$R = 1.097 \times 10^7 \mathrm{m}^{-1}$ をリュードベリ定数という。バルマーの式は、この式にあるmを2にしたものに等しい。

ハンス・リュードベリ（1854～1919）
スウェーデンの物理学者（分光学）

ボーアの理論



1．原子内には、電子がエネルギーを失わない定常状態がある。

2．電子は、定常状態間を量子飛躍によって遷移する。

3．定常状態では、電子の角運動量がプランク定数の整数倍となっている（量子条件）。

結果は、しっかりと数で表示

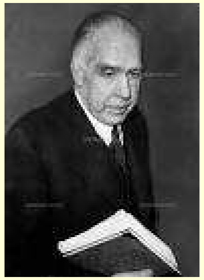
原子の半径：$r = \left(\frac{n^2}{Z}\right)\frac{1}{k}\frac{h^2}{4\pi^2 m_e e^2} = a_0\left(\frac{n^2}{Z}\right)$

$$= 0.529 \times 10^{-10}\left(\frac{n^2}{Z}\right)$$

電子の速度：$v = \left(\frac{Z}{n}\right)k\frac{2\pi e^2}{h} = \frac{c}{137} \times \left(\frac{Z}{n}\right)$

電子のエネルギー：$E = -\left(\frac{Z}{n}\right)^2 \times \frac{2\pi^2 k^2 m_e e^4}{h^2}$

$$= -13.3\mathrm{eV} \times \left(\frac{Z}{n}\right)^2$$

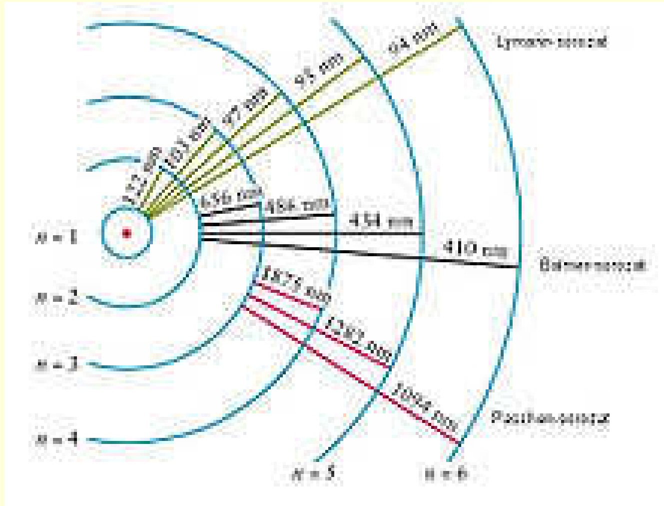


リュードベリの式を導いた

$$h\nu = E_n - E_m$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{2\pi^2 k^2 m_e e^4}{c} Z^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

リュードベリの式の意味：
定常状態n→定常状態m
の際に放出する光の波長
リュードベリ定数も
理論的に求められた。



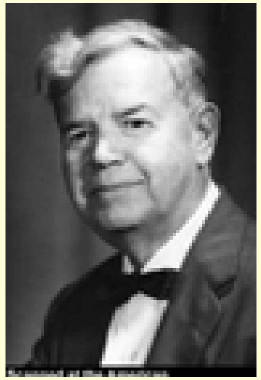
科学者の自由な楽園
コペンハーゲン精神

クラマース
1894～1952

クライン
1894～1977

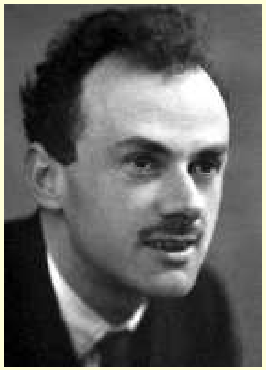
パウリ
1900～1958

仁科芳雄
1890～1951



スレーター
1900～1976

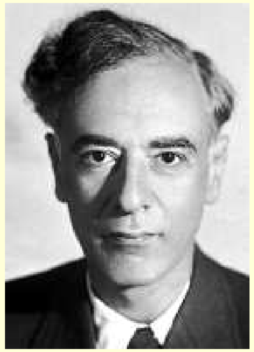
ハイゼンベルク
1901～1976



ディラック
1902～1984

ラビ
1898～1988

ガモフ
1904～1968



ランダウ
1908～1968

コペンハーゲン精神に学んだ日本人科学者

堀は、朝永振一郎の義兄

杉浦義勝(1895)，堀健夫(1899)，青山新一(1882～1959)
仁科芳雄、木村健二郎（1896～1988）
仁科は、1923年4月から1928年12月まで滞在。
この他に、高嶺俊夫(1885～1959)と福田光治（1887～1970）がいる。

ファインマンの言葉

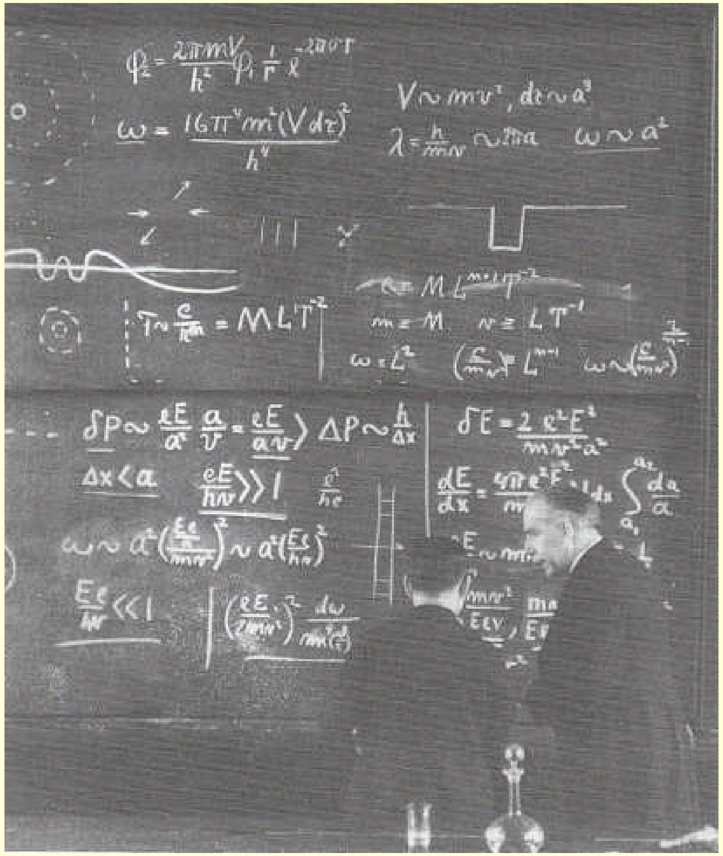
もしも今何か大異変が起こって、科学的知識が全部なくなってしまい、たった一つの文章だけしか次の世代の生物に伝えられないとしたら、僕は、

すべてのものは

原子からできている

と残すだろう。

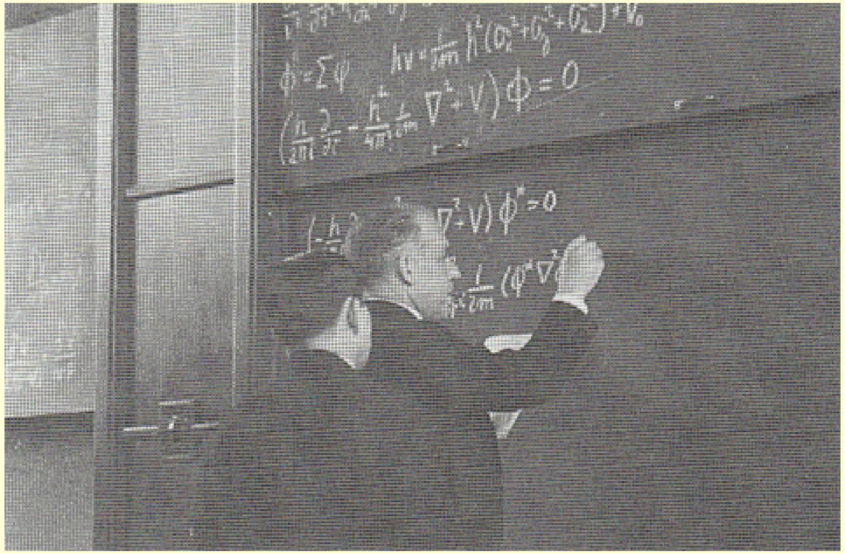
ボーア来日①
1937年(昭和12年)4月15日～5月15日



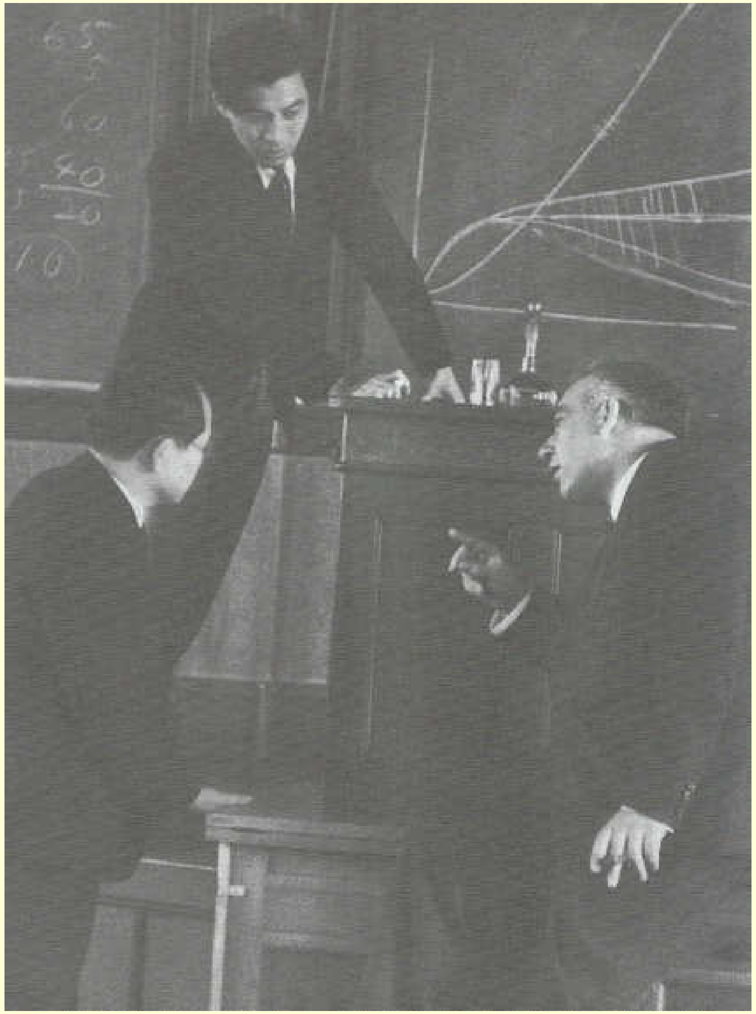
ボーアと招聘した仁科芳雄（1890～1951）

富士山を背にして。ハンス、
マルグレーテ、ボーア、仁科

ボーア来日②
1937年(昭和12年) 4月15日～5月15日



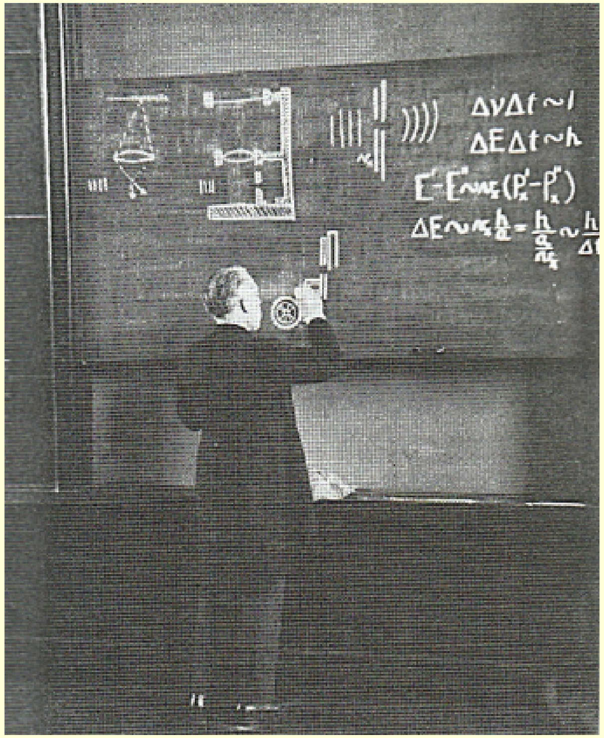
ボーアと仁科（通訳を兼ねた座長）

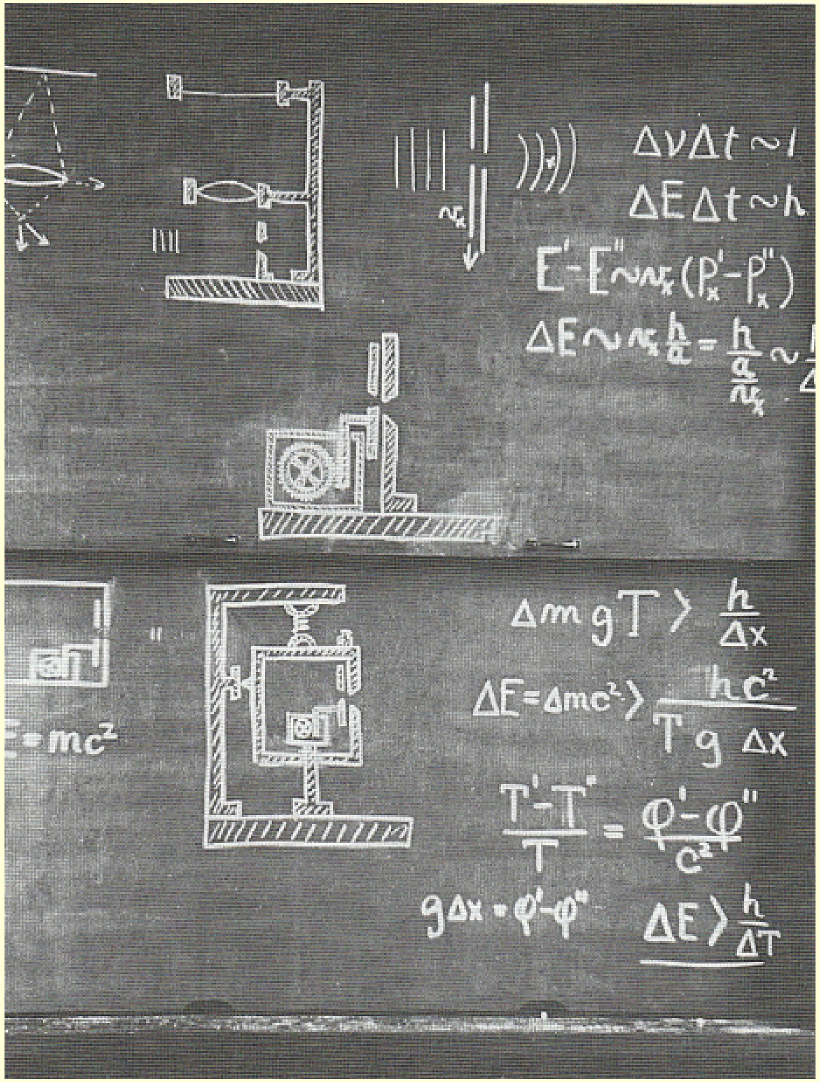


仁科、菊池正士（1902～1974）と
討論するボーア

ボーア来日③

1937年(昭和12年) 4月15日～5月15日





不確定性原理
と
自慢のアインシュタインとの論争再現

記念の一枚

ボーア、湯川秀樹、湯川夫人、オッペンハイマー

読んでいただきたい本


西尾成子著
現代物理学の父
ニールス・ボーア
開かれた研究所から開かれた世界へ
中公新書


江沢 洋
歴史に学ぶ
理科を歩む
新曜社

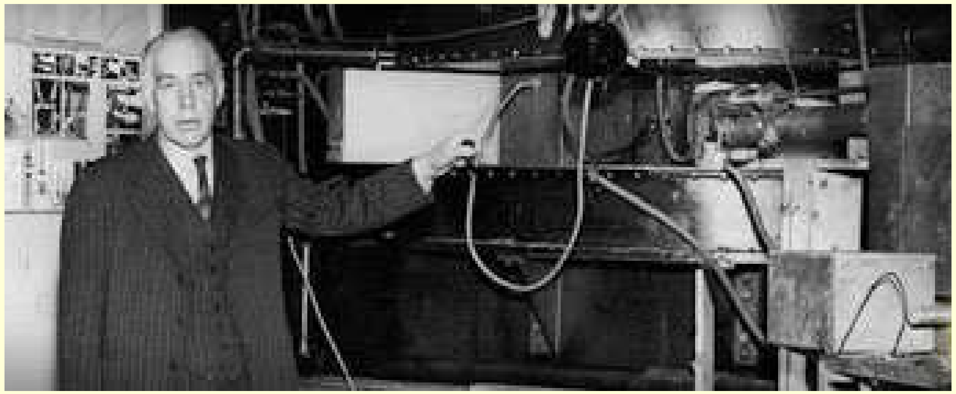

教科書にでてくる
物理学者小伝
ギリシア自然哲学者から
20世紀物理学者まで
並木雅俊 著
Springer

第44回国際物理オリンピック

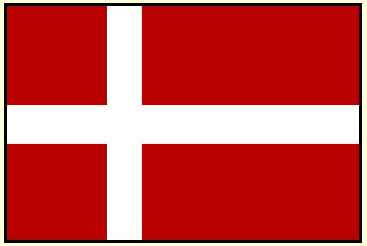
結団式(OPと共に)

IPhO
44th
Copenhagen Denmark 7-15 July 2013

全員メダリスト(銀メダル2、銅メダル3)



デンマーク　560万人



物理チャレンジ2012

申込者	1318名
第2チャレンジ	101名
代表候補者	11名
日本代表者	5名

参加国・地域　83か国

理論試験会場

全国物理コンテスト「物理チャレンジ」の特色

- 第1次選考は理論問題コンテストだけでなく、実験課題レポートも実施。
  - ・「身の回りの材料を使って温度計を作ってみよう」（H25）
  - ・「音速を測ってみよう」（H24）
  - ・「大気圧を測ってみよう」（H23）
  - ・「氷の密度をはかってみよう」（H22）
  - ・「はね返り係数」と「お湯の冷め方」の選択課題（H21）
  - ・「連成振り子の動きについて調べてみよう」（H20）
  - ・「1オクターブ出せる楽器をつくろう」（H19）
  - ・「空気の密度をはかってみよう」（H18）
  - ・「あなたの場所の重力加速度を求めてみよう」（H17）

- 第2次選考は100名参加の合宿形式（3泊4日）。
  理論・実験試験（各5時間）のほか、物理を通した交流の機会（①～③）も実施。

①第一線研究者特別講話　　②物理研究者によるデモ実験　　③プロが導く研究施設見学

さらに、参加者グループのまとめ役としてOBと開催地の大学院生が参画。

生活知から科学へ

生活知から説明知

特殊性（時代、場所、人間、社会に限定）、

局所性（知識の守備範囲が制限）、

断片性（場当たり的、当意即妙）、

⇒ 一般性、総体性、体系性

生活知 ⇒ 技術 ⇒ 科学 ⇒ 形而上学

誤概念(misconception) 1

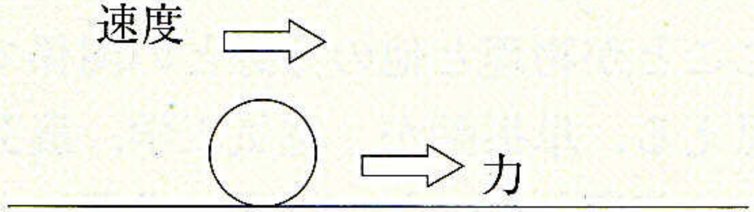


図１　運動方向にはたらく(?)力

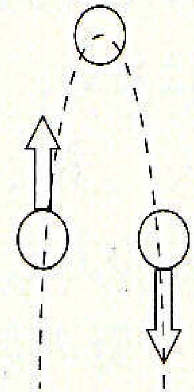


図２　コイン・トス問題

「運動は、力を必ず伴う」を信仰している。
玉突き台の上を転がる球にはたえず転がっていく方向に力がはたらくと考えている。鉛直に投げ上げたコインにはたらくも同様。

誤概念(2)

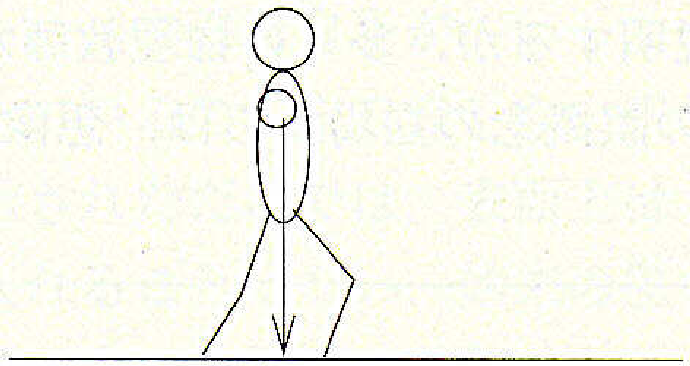


図３　直落信念

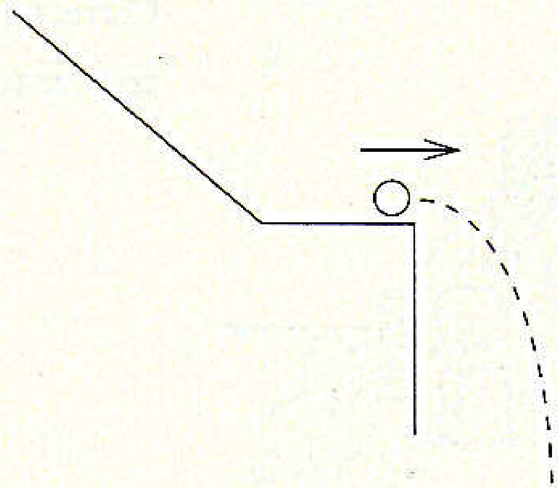


図４　崖問題

歩きながらボールを落とすと、ボールの軌跡はどうなるか。
鉛直に落ちるが49％、後方に落ちるが9％であった。
転がってきたボールが崖から落ちるとどうなるか。
これは正解が多い。人が関与していると惑う。

誤概念(3)

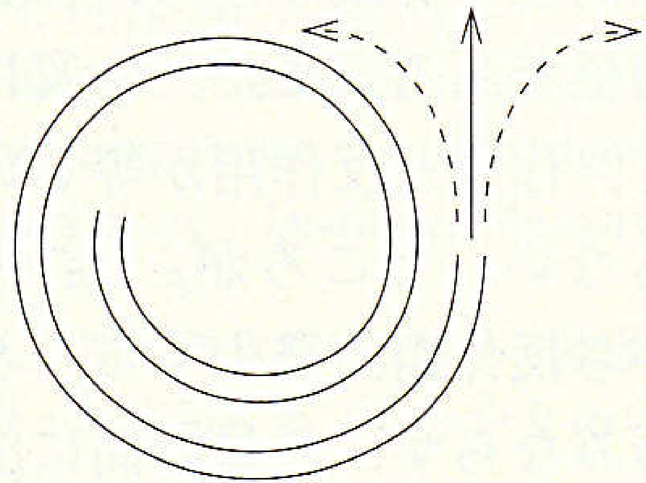


図 5　ホース問題

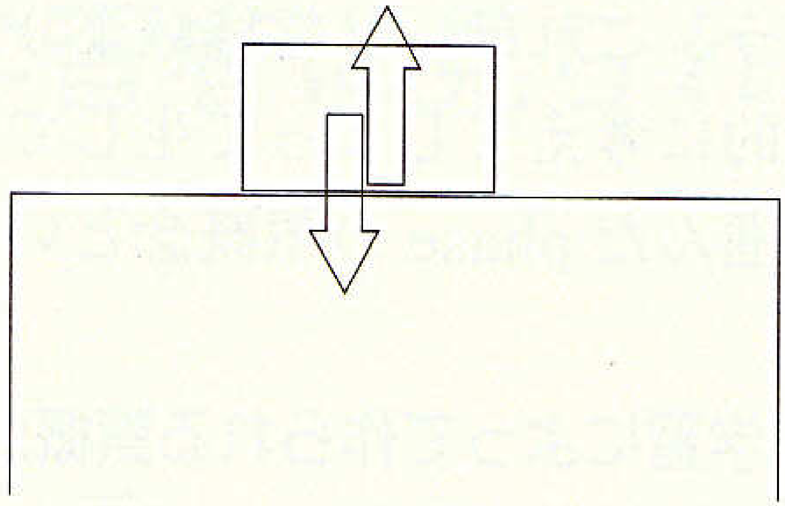
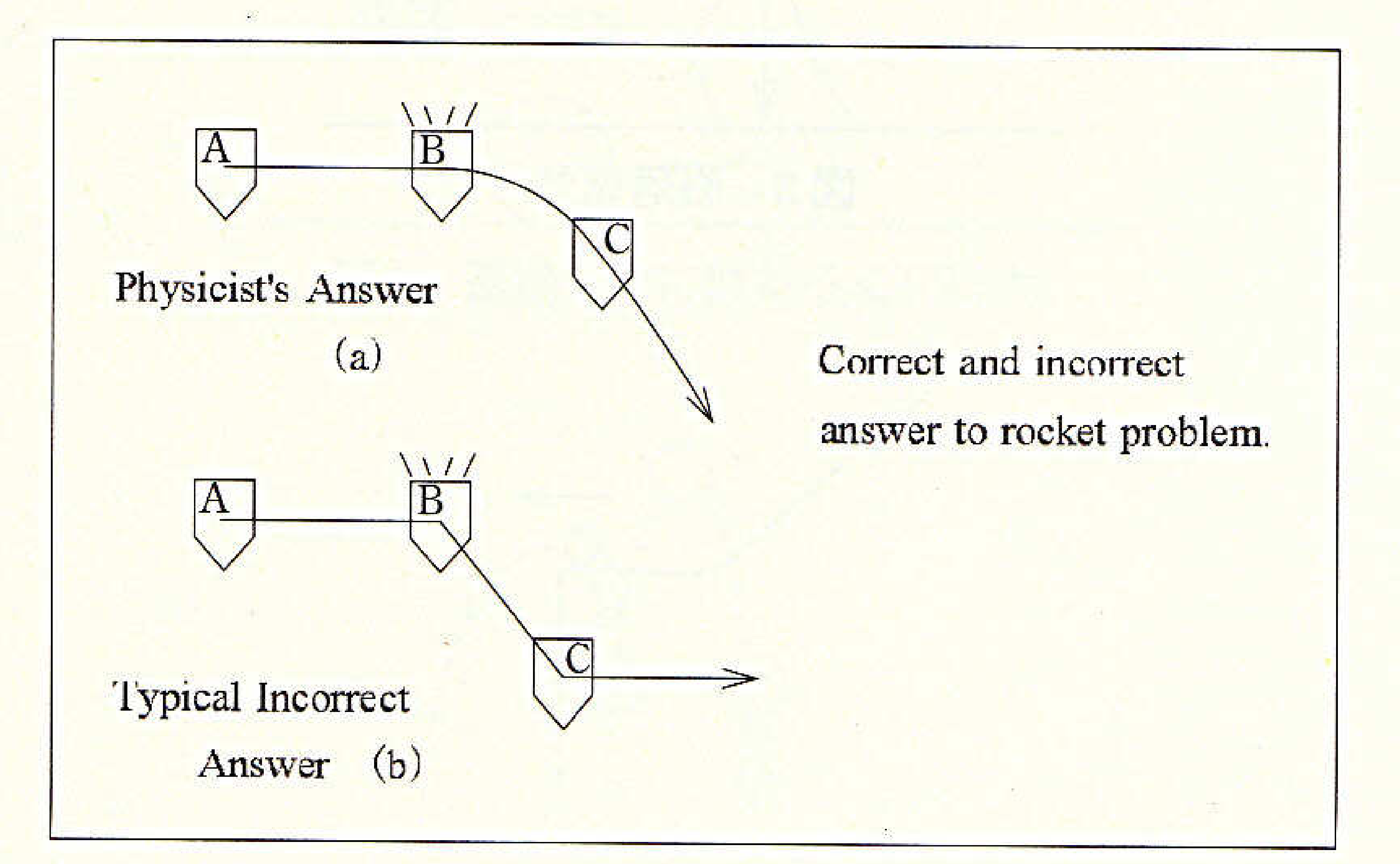


図 6　作用と反作用？

学習すると間違える。慣性を考えて内側に、
遠心力を考えて外側とする学生が多かった。
作用・反作用の法則の理解に誤りがある。
物質に弾性があるから反作用が生じる、と教えている高校教師が多い。
作用と反作用に因果があると考えているようである。

誤概念(4)



対象は理工系学生ではあったが、(b)の答えが多かった。
BとCで軌道を直角に曲げたものも多かった。C以後の軌跡をAB間と同じとしたのは、原因としてAB間の運動を考えたのか。

自然学と数学

アルキメデス像(ベルリン)

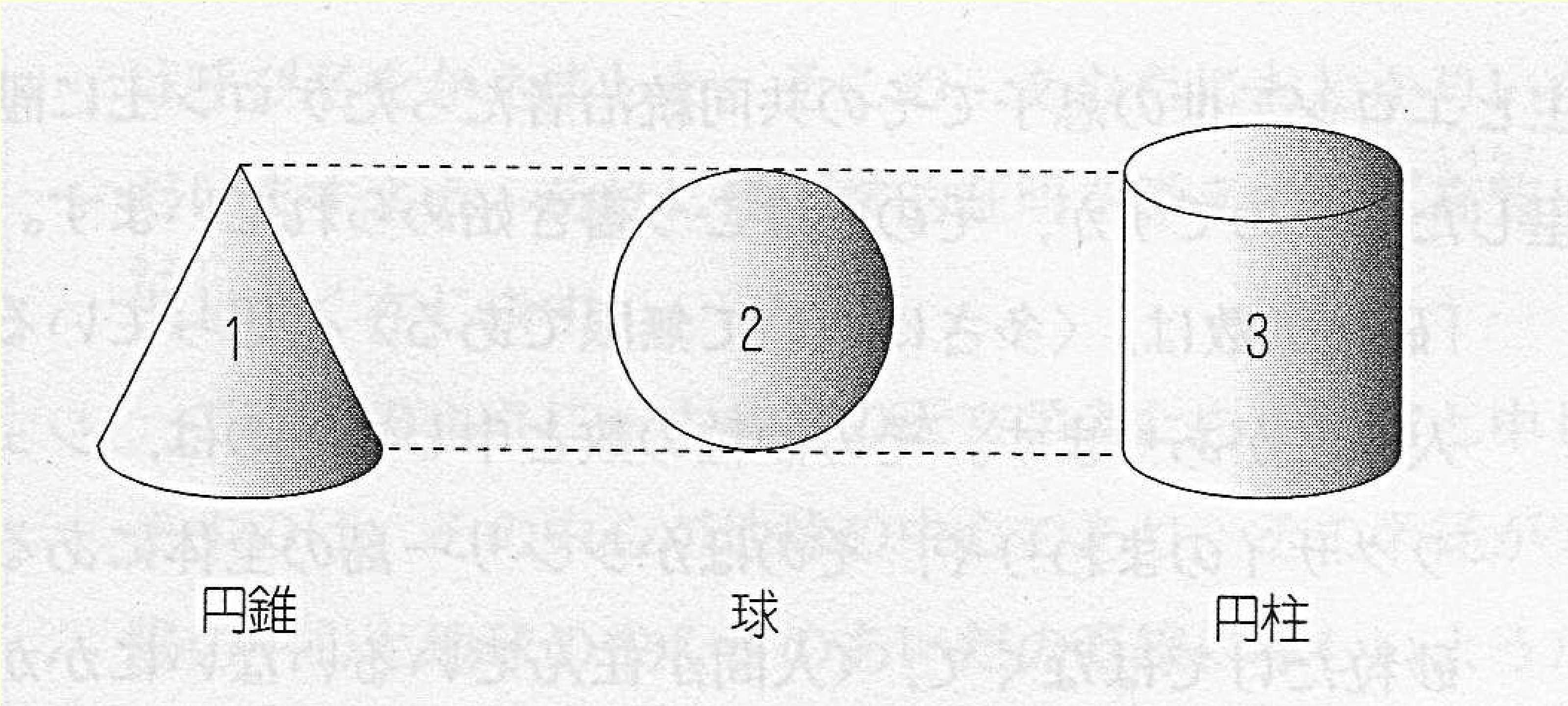
アルキメデス（BC287〜BC212）
てこの原理
アルキメデスの原理、
円錐、球、円柱の体積

問４　氷山の水面上に浮かんでいる部分の全体に対する割合はいくらか。ただし，海水の密度を1024kg/m^3，氷の密度を917kg/m^{3}とする。最も適当なものを，次の①〜⑥の中から一つ選びなさい。

①　89.6％　　②　88.3％　　③　52.8％　　④　47.2％　　⑤　11.7％　　⑥　10.4％

第1チャレンジ2007

アルキメデスの「球の体積」の導出



氷山の一角

ついでに、こんな問題はいかがですか

ハイヒールを履いた人の全体重 50 kgが，ハイヒールの両かかとの先（ハイヒールのかかとの先 1 本あたり断面積 5 cm^2）に加わる圧力は，象の全体重 4000 kgが象の4本の足の裏（足 1 本あたり断面積 0.2 m^2）に加わる圧力の何倍か。最も適当なものを，次の①～⑥の中から1つ選びなさい。

① $\frac{1}{20}$倍　② $\frac{1}{10}$倍　③ $\frac{1}{5}$倍　④ 5倍　⑤ 10倍　⑥ 20倍

第1チャレンジ2008

惑星は、ケプラーの法則に従う

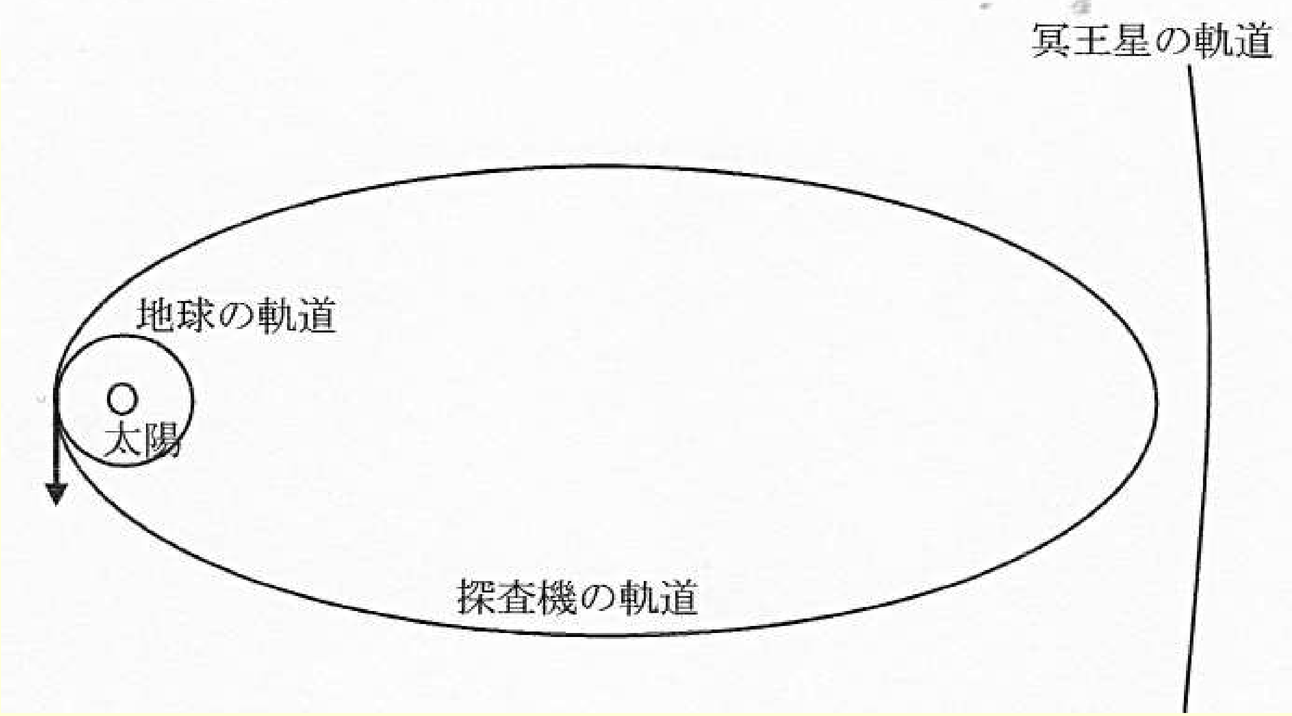
問 1　地球は楕円軌道を描いているが，ほぼ円軌道と見なすことができる。この軌道半径を 1 天文単位という。冥王星の軌道長半径は，およそ 40 天文単位である。冥王星の公転周期はおよそ何年か。最も適当なものを，次の①～⑥の中から一つ選びなさい。

①　10 年　②　40 年　③　180 年　④　250 年　⑤　640 年　⑥　1600 年

第1チャレンジ2007

問２　地球の公転軌道の接線方向に探査機を打ち上げることにする。軌道長半径が20天文単位程度になれば，もっとも太陽から離れるとき，探査機は冥王星軌道近辺に達する（次図）。この場合，探査機が地球から冥王星軌道近辺に至るには，およそ何年かかるか。最も適当なものを，次の①～⑥の中から一つ選びなさい。

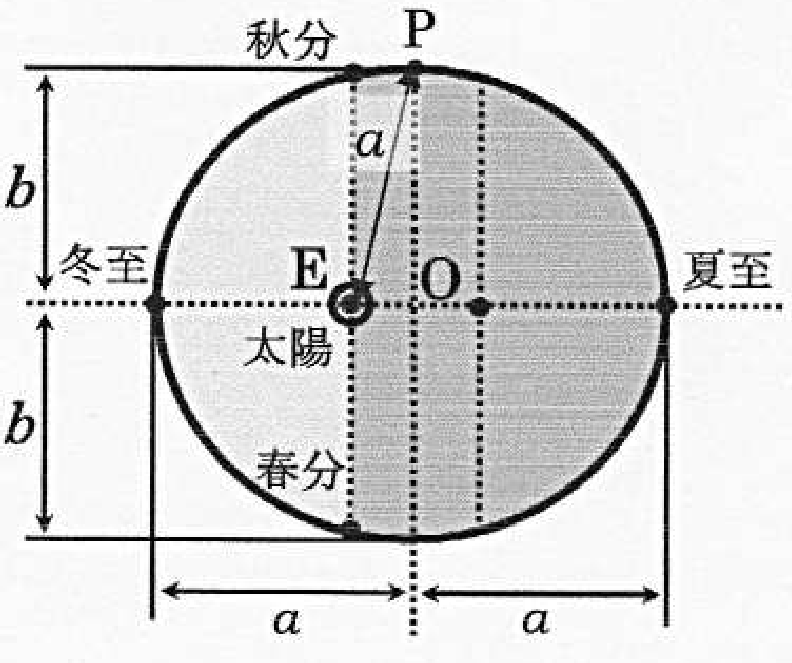
① 5年　② 30年　③ 45年　④ 60年　⑤ 90年　⑥ 120年



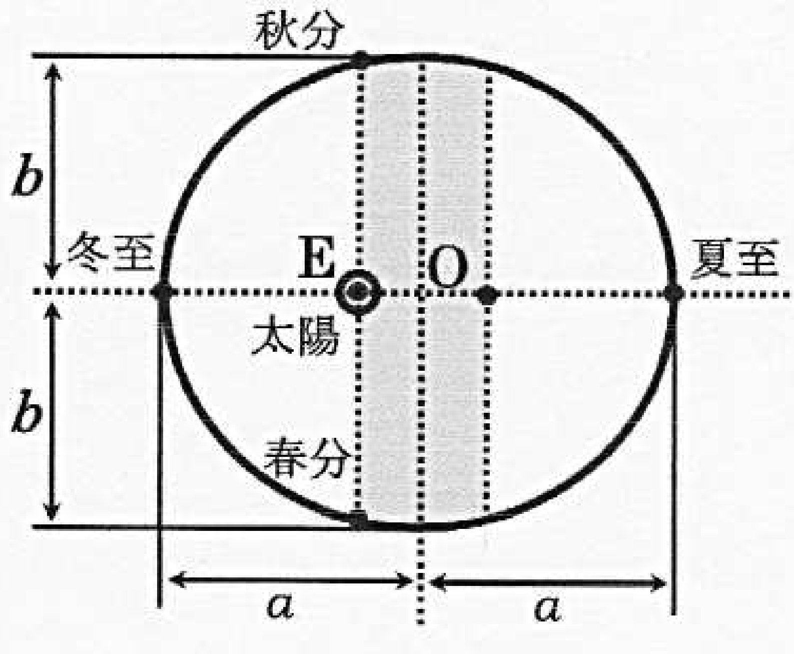
第1チャレンジ2007

D ケプラーの第１法則は，「惑星は太陽を１焦点とする楕円軌道を描く」である。地球も楕円軌道を描いているため，春分 → 夏至 → 秋分の日数n_sとし，秋分 → 冬至 → 春分の日数をn_wとすると，n_sとn_wは異なっている。この差（n_s-n_w）を次の順にしたがって求めよう。

次の図のような地球の軌道を考える。楕円の長軸を$2a$，短軸を$2b$とする。楕円の短軸の頂点をPとし，太陽の位置（焦点）をEとすれば，$PE=a$である。地球が太陽に最も近づく点（近日点）は冬至に近く，最も離れる点（遠日点）は夏至に近い。そこで冬至，夏至のときを楕円の長軸上と見なしている。



A



B

問 12　楕円の中心 O から太陽の位置 E（焦点）までの距離 OE を，a と b を用いて表しなさい。最も適当なものを，次の①～⑥の中から 1 つ選びなさい。　$\boxed{26}$

①　$a+b$　　②　$a-b$　　③　a^2+b^2

④　a^2-b^2　　⑤　$\sqrt{a^2+b^2}$　　⑥　$\sqrt{a^2-b^2}$

ケプラーの第 2 法則は，「惑星の面積速度は一定である」である。面積速度とは，惑星と太陽を結ぶ線分が一定時間に掃く図形の面積のことである。

地球と太陽を結ぶ線分が 1 年間（=365 日）に掃く図形の面積は、楕円全体の面積（$S=\pi ab$ で求められる）にあたる。n_wの間に掃くのは図Aの太陽の位置Eより左側の領域（薄い影）の面積，n_sの間に掃くのは図Aの太陽の位置Eより右側の領域（濃い影）の面積に対応する。すると，(n_s-n_w) は 2 つの領域の面積の差，すなわち，図Bの影部の面積に対応する。この影部の面積を $2b\times 2\mathrm{OE}$ の長方形の面積として近似的に求めると，

$$\frac{4b\times \mathrm{OE}}{S}=\frac{n_S-n_W}{365}$$

が成り立つ。地球軌道の測定データによると，

$$\frac{\mathrm{OE}}{a}\fallingdotseq 0.017$$

である。

問 13　(n_s-n_w) はいくらか。最も適当なものを，次の①～⑤の中から 1 つ選びなさい。　$\boxed{27}$

①　2 日　　②　4 日　　③　6 日　　④　8 日　　⑤　10 日

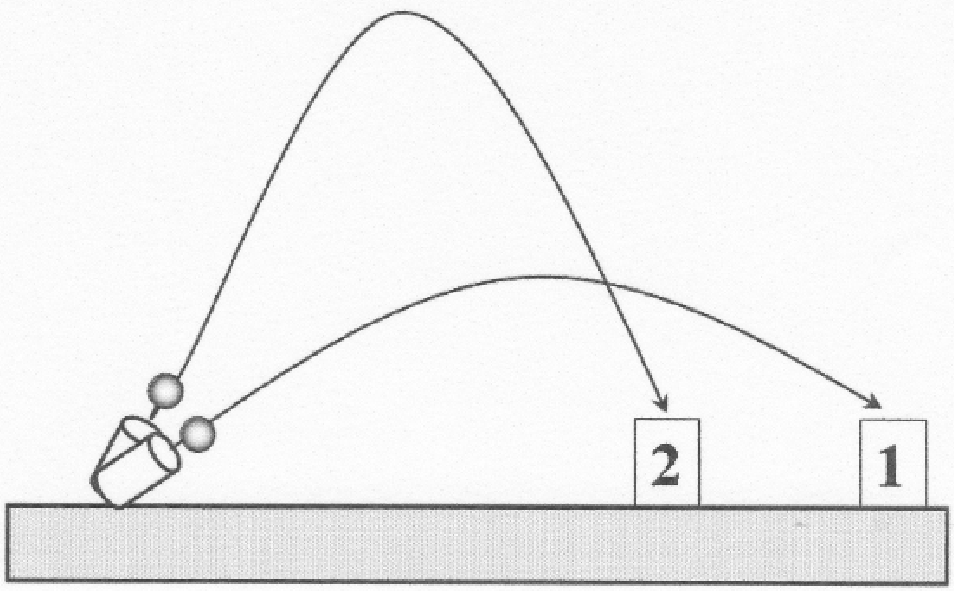
問６　下の図に示すように，投射装置が目標１，目標２に届くように同時に同質量の２個の小球を等しい大きさの初速度で打ち出した。ただし，空気抵抗は無視できるものとする。最も適当なものを，次の①～④の中から一つ選びなさい。

①　小球は，目標２より目標１の方に早く届く。

②　小球は，目標１より目標２の方に早く届く。

③　小球は，目標１，目標２の両方同時に届く。

④　小球がどちらの目標に早く届くかは，小球の初速度の大きさに依存する。



問2　図 1-2 のような斜面の高さ h から、小球を静かにはなした。

（a）斜面の摩擦がなく、小球が回転せずに滑り落ちる場合

（b）斜面に摩擦があり、小球は滑ることなく、転がり落ちる場合

の 2 通りを考える。小球が地面に到達する時間について最も適当な文を、次の①～④の中から 1 つ選びなさい。

①　滑り落ちる場合（a）の方が、摩擦がないので先に地面に到達する。

②　転がり落ちる場合（b）の方が、回転のエネルギーが加わるので先に地面に到達する。

③　（a）、（b）ともに同じ高さから球を降ろすので、エネルギーの保存則より、同時に地面に到達する。

④　（a）の方は、位置エネルギーが回転のエネルギーになることなくすべて運動エネルギーになるので先に地面に到達する。

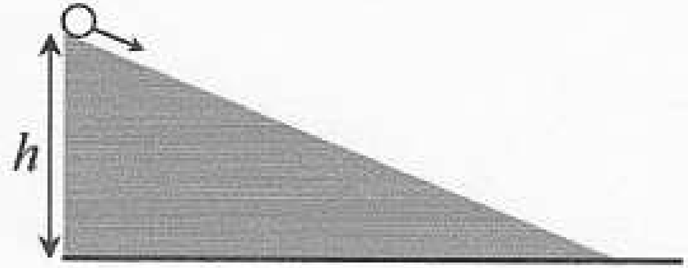
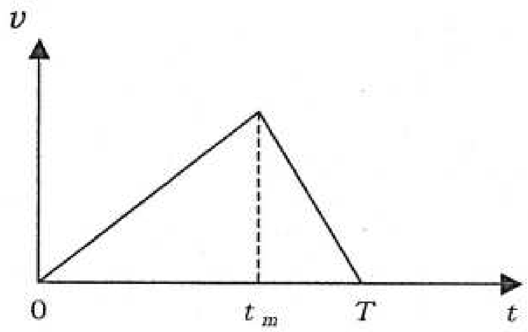


図 1-2

問1　A駅からB駅まで移動する電車の運動が，右図のグラフのように表される。横軸は時間，縦軸は速度である。ただし，A駅とB駅は一直線上にあるとする。



A駅で停車していた電車が，時刻 $t=0$ のとき一定の加速度 α で発車し，t_m秒後から，一定の加速度 β（<0）で減速しはじめた。そののち，隣のB駅で時刻 $t=T$ で到着してちょうど停車したとする。

発車してから時刻t_mまで等加速度運動しているので，速度 v は α と時間 t を用いて，$v=$ $\boxed{ア}$ ･･･（1）と記せる。

また時刻t_mより後の速度vは，$v=\beta t+c$ ･･･（2）と記すことができる。この（1）と（2）の式は $t=t_m$で一致しているので，$c=$ $\boxed{イ}$ $\times t_m$となる。これよりt_mより後の時間 t における速度は，

$v=\beta(t-t_m)+$ $\boxed{ウ}$ ･･･（3）と表すことができる。

また時刻 t におけるA駅から電車までの距離を s とすると時刻t_mまでは

$s=$ $\boxed{エ}$ ･･･（4）となる。またt_mより後は，

$s=$ $\boxed{オ}$ $\times(t-t_m)^2+$ $\boxed{カ}$ $\times(t-t_m)+d$ ･･･（5）と記せる。これらが $t=t_m$で一致しているので，（4）式と（5）式から，$d=$ $\boxed{キ}$ となる。

また，t_mとTの関係は α と β を用いて，

$t_m=$ $\boxed{ク}$ $\times T$ ･･･（6）と表すことができる。T までの移動距離，すなわちA駅とB駅の距離をLとすると，L と T^2の関係は，（5）と（6）式から，α と β を用いて，

$$\frac{L}{T^2}=\boxed{ケ}$$

と表せる。

A駅からB駅までの距離は1.8 km，加速度 $\alpha=0.20\ \mathrm{m/s^2}$，$\beta=-0.80\ \mathrm{m/s^2}$であったとすると，この電車の所要時間は $\boxed{コ}$ 秒である。

第1チャレンジ2008

問1　図 1-1 のように、出発点と終着点の高さがそれぞれ等しく、水平方向の距離 ℓ が等しい２つの経路 A、B がある。これらの経路の途中には異なる２種類の斜面がある。この２種類の経路で、出発点から小球を同時に転がすとどうなるか。正しいものを、次の①～④の中から１つ選びなさい。

① 経路 A は２回加速するので、先に終着点に到達する。
② 経路 B は初めの斜面で速度が大きくなるので、先に終着点に到達する。
③ 経路 A、B ともに、経路の長さが等しいので、同時に終着点に到達する。
④ 経路 A、B ともに、出発点と終着点の高さが等しいので、同時に終着点に到達する。

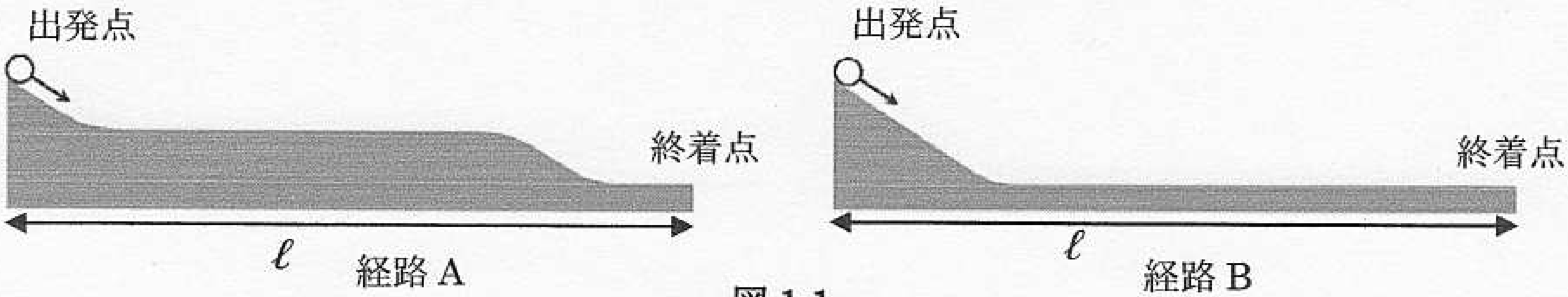


図 1-1

問 3　図 1-3 に示すように、高い崖（がけ）の上から、小球を次の A〜C の方法で等しい速度の大きさ v_0 で打ち出す。

A.　鉛直上方に打ち出す
B.　水平に打ち出す
C.　鉛直下方に打ち出す

A〜C それぞれの場合に、地面に到達する直前の速さを v_A、v_B、v_C とする。これらの大きさの関係について、正しいものを、次の①〜⑥の中から 1 つ選びなさい。ただし、空気抵抗は無視できるものとする。

① $v_A > v_B > v_C$　　② $v_C > v_B > v_A$

③ $v_B > v_A > v_C$　　④ $v_C > v_A > v_B$

⑤ $v_A = v_C > v_B$　　⑥ $v_A = v_B = v_C$

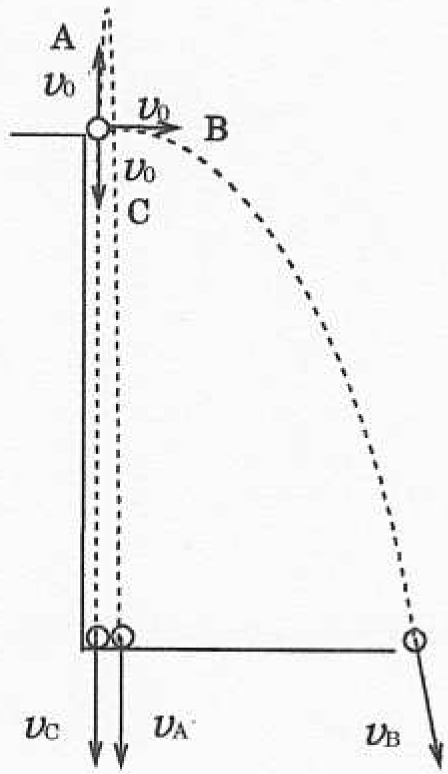


図 1-3

第1チャレンジ2009

ふしぎだと思うこと、
これが科学の芽です。
よく観察してたしかめ、
そしてよく考えること、
これが科学の茎です。
そうして最後になぞがとける、
これが科学の花です。

朝永振一郎
1906～1979