

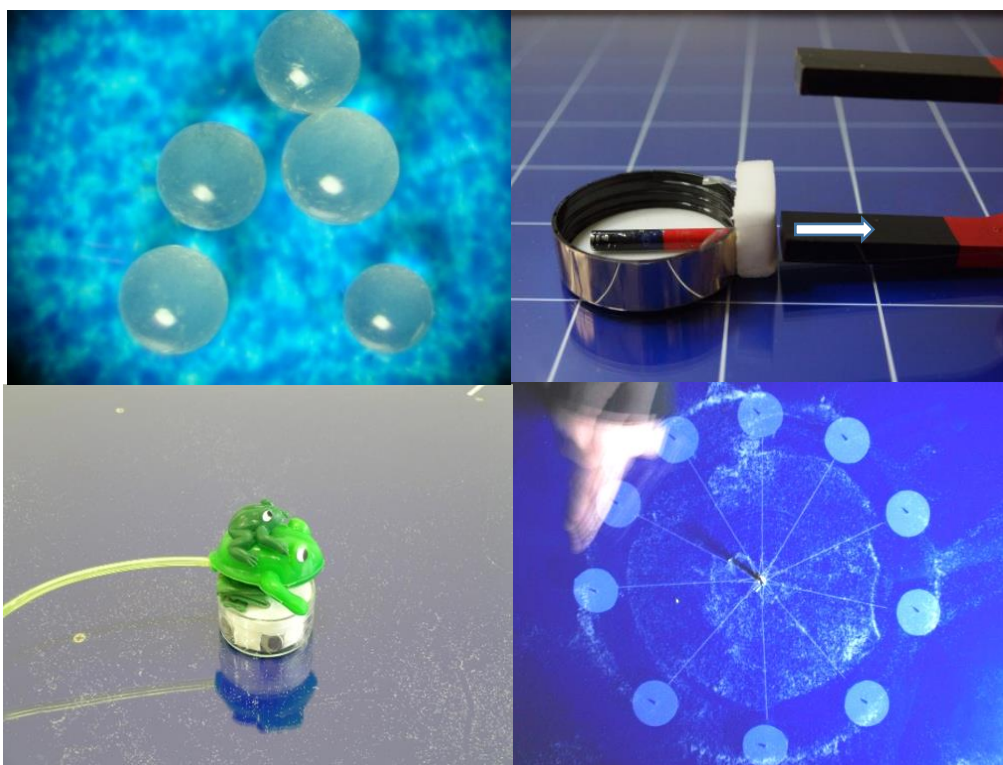
「微小ビーズをもちいる摩擦のない 力学・波動演示実験」

大阪私立中学校高等学校理科教育研究会

物理部会研修会

令和2年2月22（土）15：00～18：00

（会場：大谷中学校・高等学校 北館2階 物理教室）



講師：福井大学名誉教授、NPO ふくい科学学園理事長

香川喜一郎

（実験補助：ふくい科学学園 香川 弘子）

1. はじめに

力学は理工学の基礎であり、高校の物理で力学の概念形成を十分行っておく必要があります。しかし、力学は難しいと受け取られています。その大きな理由は、摩擦が影響する条件下では、理論どおりに運動の様子を見ることが困難なことです。また、重力による落下等の現象では、物体の運動がごく短時間で終了してしまい、生徒が運動を十分観察することができないことにあります。我々は摩擦のない（無視できる）力学演示実験装置を考案しました。これによって生徒は楽しみながら、教科書に登場する力学の法則・現象の殆どを、目で見て確実に納得しながら学習することができます。現在、摩擦のない運動の観察には、力学台車やエアトラック、またドライアイスなどが使われています。しかし、こうした特殊な実験装置での運動演示実験では、一般的な法則として生徒たちが理解するのは無理です。我々は特殊な条件下ではなく、現実に近い状況下でしかも安価に演示実験を行うためにプラスチックの微小ビーズ球を用います。この実験方法において、微小ビーズ球は、ボールベアリングの役割を果たし、摩擦のない状態での物体の運動を実現します。今回は運動の第一法則、第二法則、作用・反作用の法則、円運動、水平バネ振動、斜面運動、位置エネルギーから運動エネルギーへの変換など、高校の教科書に見られる運動について実験例を紹介します。また、摩擦のない装置を利用した、ゆっくり進む波の演示実験も行います。

2. まさつのない装置

台車

今でも教科書で使われている台車



教科書で使
われる台車

ホバークラフト



ゲームもできます

モーターの音がしますが、モーターの力で動く
のではないことに注意させる！

改良風船ホバークラフト



市販のものは1個800円もし、
風船がふらつきます。改良型を
自分で作ることができます。

ピンポン球を使う



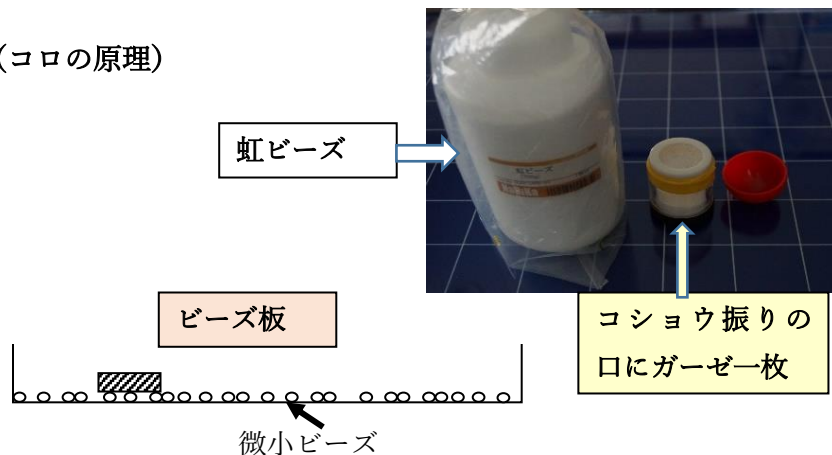
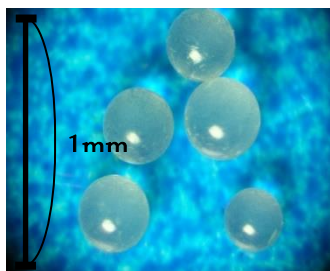
微小ビーズを用いる摩擦のない装置のしくみは、ピンポン球を用いて説明できます。(ピンポン球が回転することに注意！)

ピンポン球の数が多い場合、ピンポン球同士がこすれあって、抵抗が大きくなります。微小ビーズも散布密度を薄くすること！

(コロの原理)

微小ビーズを用いるまさつのない装置

(顕微鏡
40倍)



微小ビーズ (直径: 約 0.3mm) は玉の質量がごく小さいので、回転してもエネルギーをほとんど使いません。また、虹ビーズ (微小ビーズ) の場合、少しかたむけたとしても、ビーズが表面にくっついて (静電気や分子間力により) 流れないことにも注意しましょう。

※注意: 小さな虹ビーズが目や、口に入ってはいけないので、手でビーズにふれないように注意しましょう。ビーズが手についたらウエットティッシュで手をふき、実験が終わったら、水で手を洗い流しましょう。



- ・ビーズ板上で、底が平たくて、軽い物を動かしてみます。

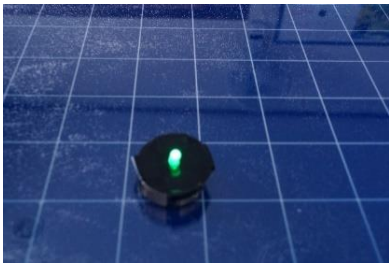
ビーズを拭きとるときは、刷毛で集めて、濡れティッシュで、またはハンディークリーナーを使用

棒磁石を入れた容器が北を向く

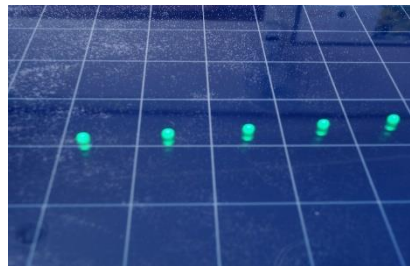
小さな棒磁石を底が平らな容器に取り付けビーズ板の上に置きます。すると磁石のN極が北の方向に向くように容器は回転します。



3. 運動の第1法則



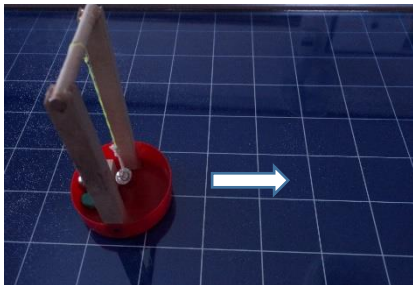
5 Hz



シャッター時間：1秒

パルサーで等速運動
を見る

“慣性の法則”



台が止まると
重りだけ、
前に飛び出る



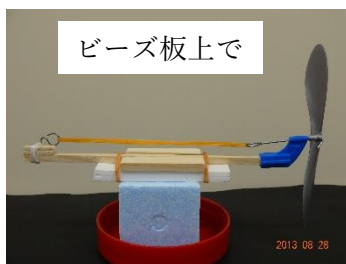
静止物体におけ
る慣性の法則
(ビーズ板を急
に動かす：指で物
体の中心を指す)



摩擦では
大きな力
は伝わら
ない

4. 運動の第2法則 (力と運動)

加速度運動 ($F = ma$: 力があれば加速度を生じる)



プロペラが回転し、前に進む推進力を作
ります。(摩擦がないので、弱い力でも
加速度を生じます)

(注意：前部と後部を両手でそれぞれ持
ち、同時に放すようにします。そうしな
いと回転します！)

磁石間の力で加速度運動



- ・磁石と磁石の間にクッション片(約2cm厚)を入
れて、2つの間の距離をほぼ一定(即ち、力一定)に
して引きます。磁石の速度はだんだん速くなります
(加速度運動)。

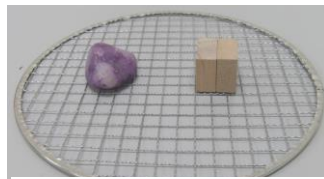
- ・クッションの厚みを変えると、力Fを変えること
になり、力と加速度の関係を定性的に感じ取れます。

速度と逆方向の力では



紙の上では摩擦があり、速度と逆方向の力が働き、減速となります。

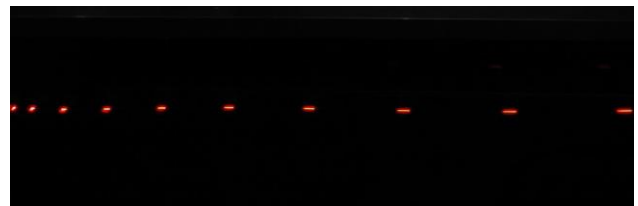
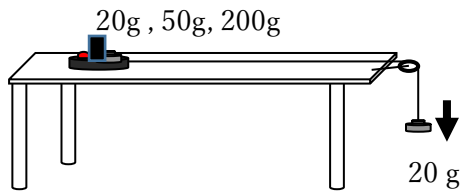
重力による加速度 ($F = ma$: F は m に比例し、 a は一定)



・餅網に乗せた石と木(床にクッションを敷く)。餅網を重力加速度より大きな加速度で急に下に引くと、瞬間、物体は浮く

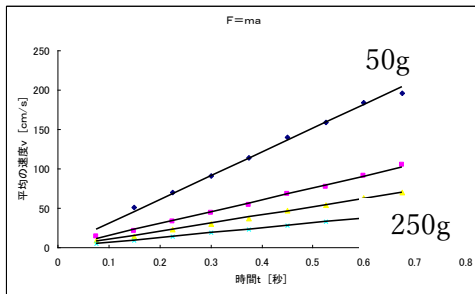
大学で学生に聞くと、意外に中・高等学校で自由落下の実験を行っていないのに驚きます！

m と、 F を独立に変化させて $F = ma$ を確認

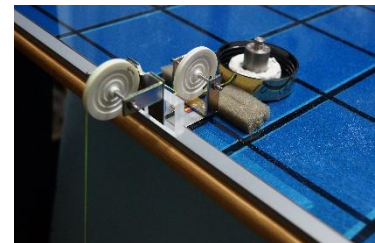


加速度運動をしているのが分かる(パルサー使用)

ビーズ板上を一定の力で引く



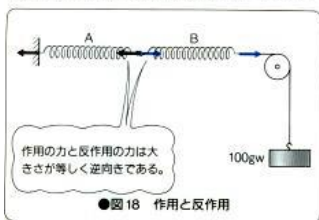
時間と速度の関係



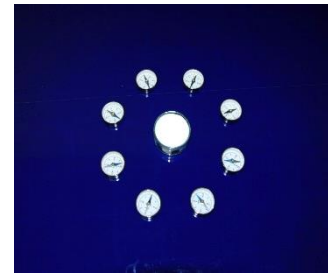
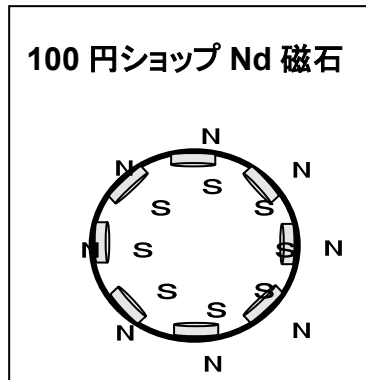
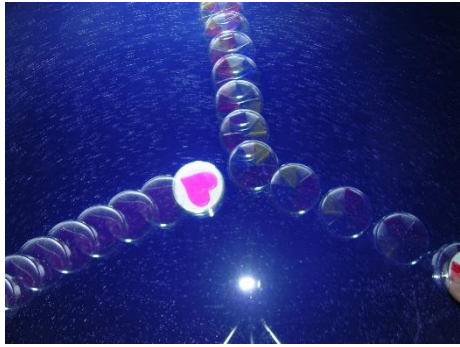
定性的に演示する場合は、窓に取り付ける滑車(数百円)でも十分です。

5. 運動の第3法則

a. [作用反作用の法則(運動の第三法則)]

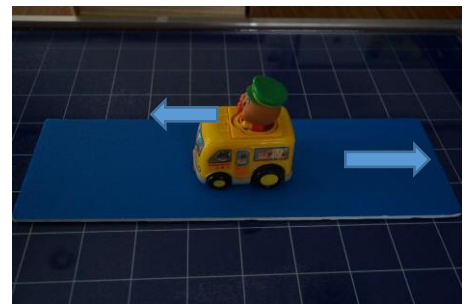
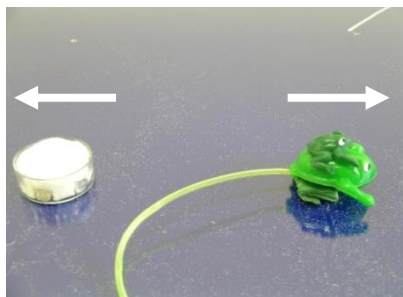


紙パイプの上にスチロールの台を置き、押したり引いたり



磁針を周りに置く

物体が離れていても、動いていても作用・反作用の法則は成立する (2つの円形磁石の動きで示す)

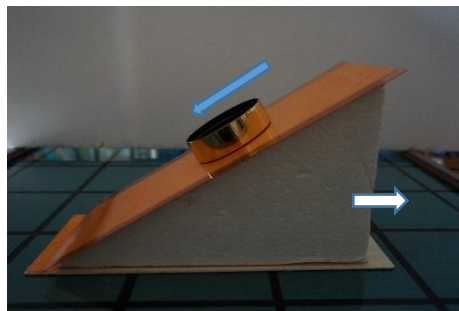
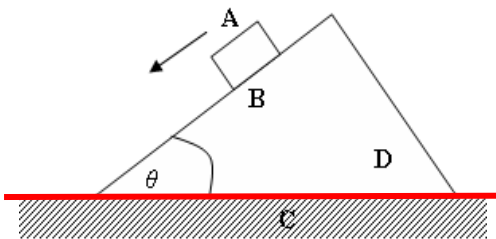


ビーズ板の上で台に乗ったおもちゃのカエルがジャンプすると (西松屋で1個400円)

車が台の上を進むと、台は逆方向に動く

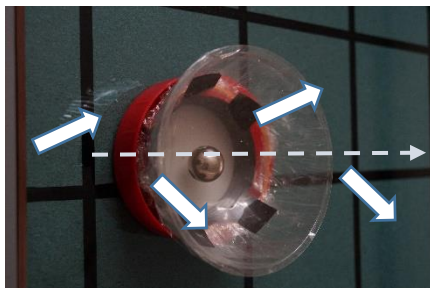
5

イメージしにくい問題 (入試問題)



入試問題：
“摩擦がないとして---”は生徒には難しい：目で見れば納得！

面白い蛇行運動



- ・ 容器の中の金属球を揺らすと反作用で下の台が逆に動く
- ・ 通常は見られない”蛇行運動”をします

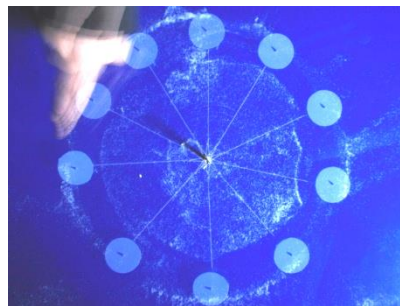
6

6. 円運動、バネ振動、衝突など

等速円運動

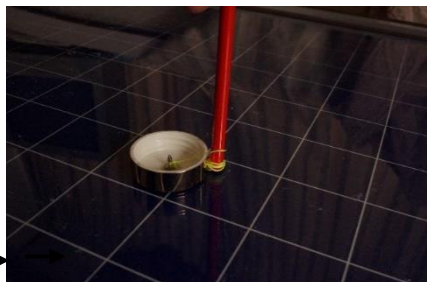
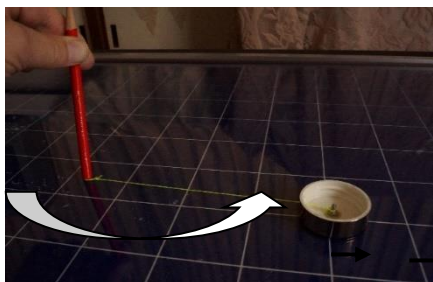


大きな円筒パイプの内側に沿って
等速円運動させ、明るい LED で照らし
て**単振動する影を観察**



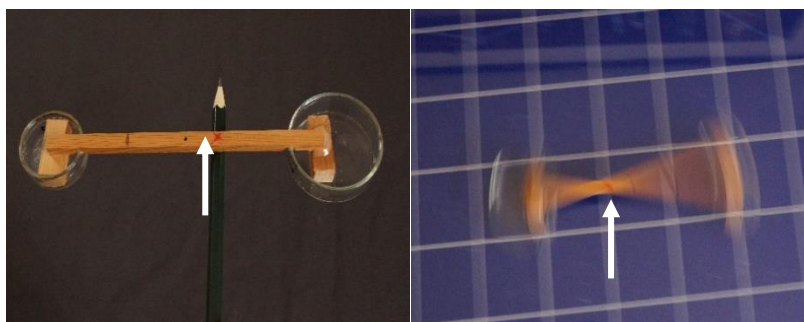
糸で引いて等速円運動を観察
(ストロボ照明下で撮影)

角運動量保存 (中心力の場合)



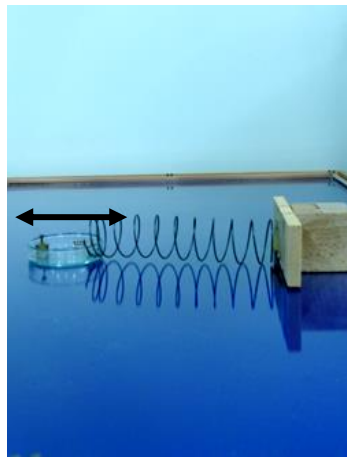
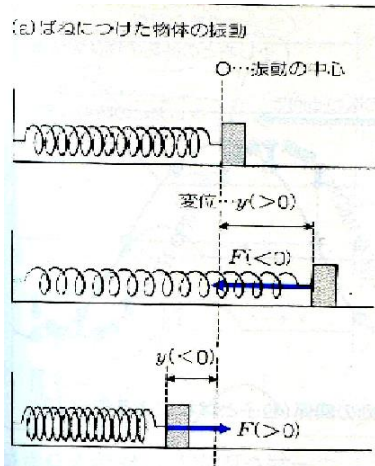
角運動量保存の法則 ($L = \mathbf{r} \times \mathbf{P}$) (スケートのスピン: 腕を縮めると回転速度上がる)

剛体の回転運動



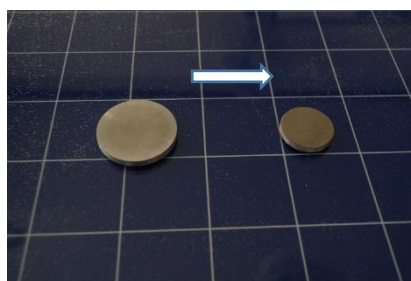
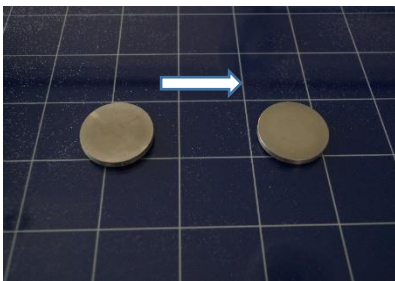
地球は地球・太陽の重心点の周りに回転 (イメージしにくい事を可視化)

水平バネ振動



ビーズ板上で水平
バネ振動
(ガラスシャーレ
内の重りを変えて
振動周期を比較)

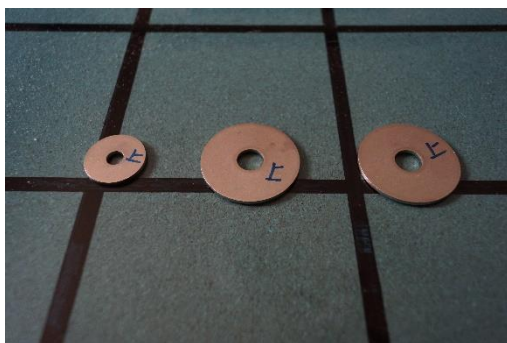
衝突現象



質量同じ：完全に速度が置き換わる

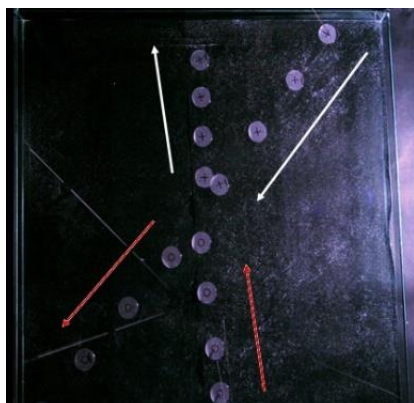
質量が異なる場合の衝突

連なった玉に1個が衝突



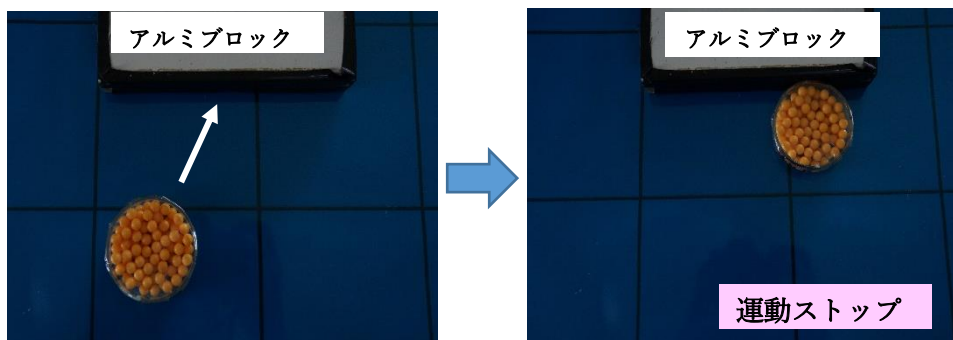
- ・衝突実験に使用する金属の円板を製作依頼すると経費が相当高くなります。
- ・ホームセンターで大きな”ステンレス丸ワッシャー(M10, M6)を探してみてください(2個入って300円程度)

斜め衝突



衝突前の速度合成ベクトル
＝衝突後の速度合成ベクトル
(ストロボ照明下で撮影)

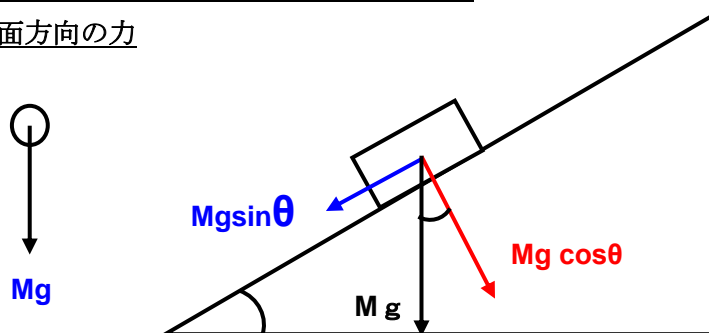
非弾性衝突



運動エネルギーが熱エネルギーに変化するのを可視化
(衝突時、ガラスシャーレ内のBB弾が動いている)

7. 斜面に関わる実験 (斜面にビーズをまく)

重力から来る斜面方向の力



- ・摩擦のない斜面を使うと、うんと加速度が小さくなる
- ・(例) $\theta = 1$ 度, $g \sin \theta$ は60分1

摩擦のない斜面を用いることで、重力下鉛直面で起こる現象をゆっくりした相似運動に再現できる

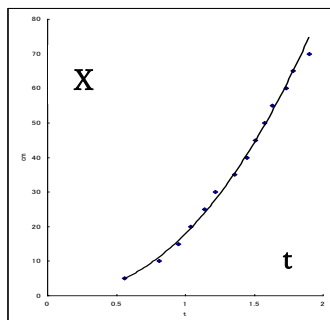
生徒は容易に理解できる

急な斜面には塩ビシートなどを貼り、ティッシュなどでこすり、静電気を与えビーズを付着させる

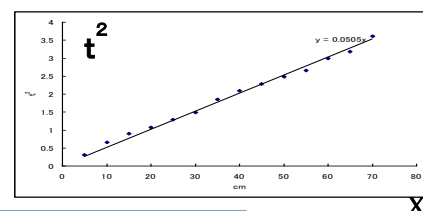
斜面を落下する距離と時間の関係



ガラスにビーズをまく



ストップウォッチで測定

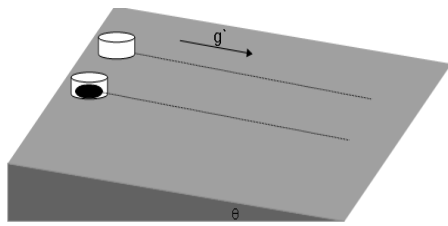


$$g' = g \cdot \sin \theta$$

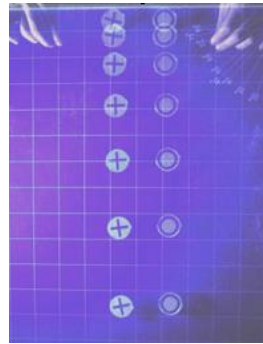
$$\sin \theta = 0.01$$

$$\Rightarrow g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

質量によらず同じ様に斜面落下（鉛直自由落下と相似）



傾けたビーズ板



・質量が異なっても同じように落下するのをゆっくり観察できる

モンキーハンティングの実験

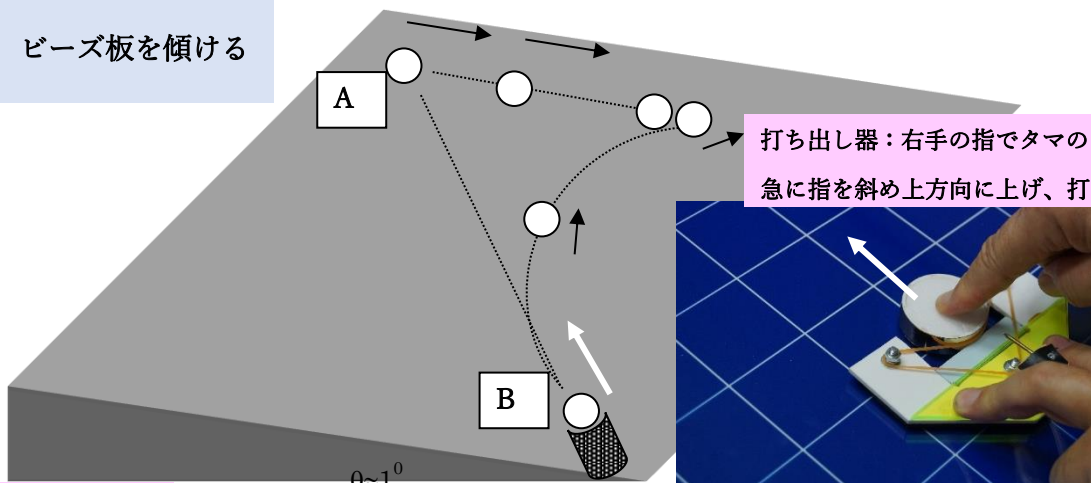
・木の枝に猿（サル）がぶら下がっています。サルを目がけて石を真っ直ぐに投げます。

その瞬間、サルは石からのがれようと、枝をつかんでいた手を放し落下します。結果は、必ず石はサルに命中してしまうのです。これが有名な”モンキーハンティング”です。

まず、水平投射を見る

・石は前方に進みながら重力の作用で垂直方向に落下します。ある時間内に、サルが落下する垂直距離も、石が落下する垂直距離も同じなので、こんな現象が起こります。

ビーズ板を傾ける

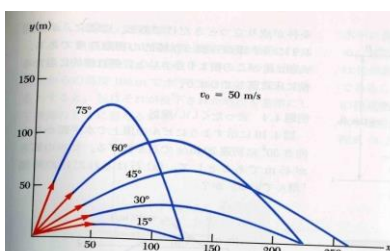


打ち出し器：右手の指でタマの中心をおさえ、急に指を斜め上方向に上げ、打ち出す

ゲーム

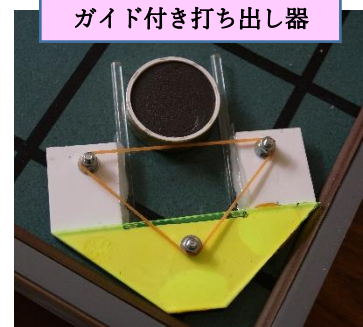
1、2、3でタイミングを合わせ、ガラスシャーレAは放され、BはタマAを目がけて打ち出されます。Bの速度にかかわらず、必ずAに命中する面白さがあります。

最も遠方にボールを飛ばす角度

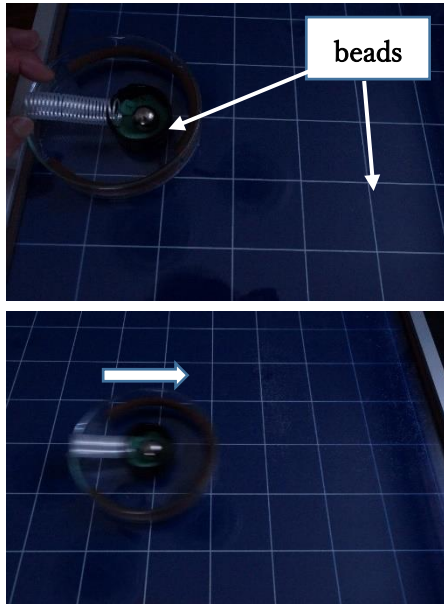
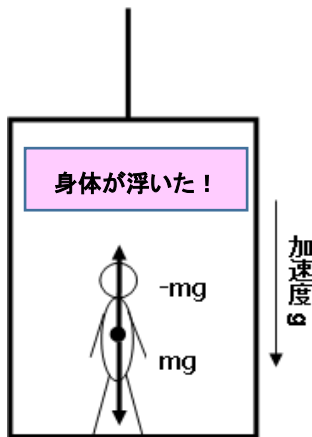


・打ち出し器のゴムの強さを一定に保ち、打ち出す角度を変化させ、到達距離が最高になる条件を探ります。
・理論どおり、約45度のとき最高。

ガイド付き打ち出し器



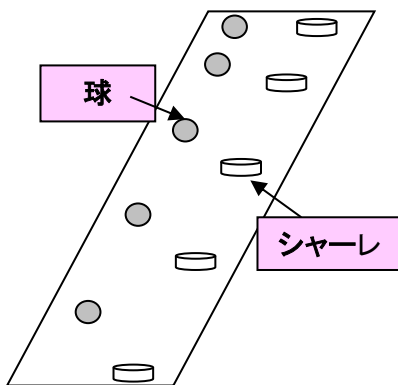
無重力状態を見る



落下前、大きいガラスシャーレの中の小さいガラスシャーレに取り付けたバネは伸びている

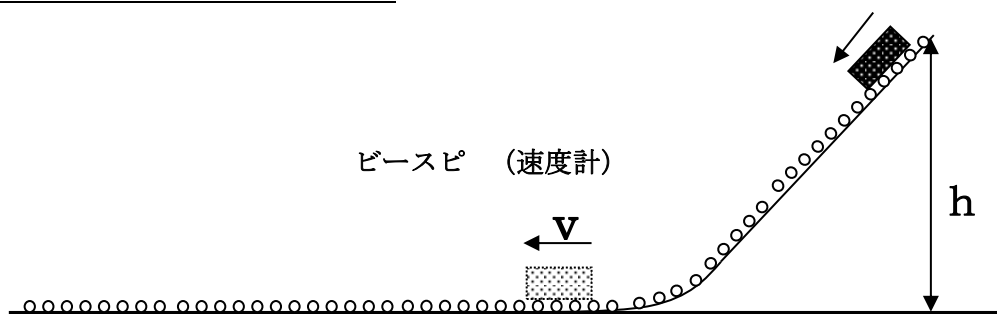
斜面を落下し始めると、無重力となり、中の小さいガラスシャーレの重さはゼロ、したがってバネは自然長となる。

玉と小ガラスシャーレはどちらが速く落ちる？



・ボールは回転するので回転エネルギーにエネルギーを使います。その結果、前進の速度は減少します。

位置エネルギーから運動エネルギーに変換



$$V = \sqrt{2gh}$$

・ボールを転がして実験すると、回転エネルギーにエネルギーがとられ、前進方向に進む速度は下がり、大きな誤差が生じる

8. 波動実験への応用

水面波や地震波、音波、光波、電波など自然界は波で満ちており、波の性質の理解は非常に重要です。しかし、通常の波は非常に速く伝播し、観察することは難しく、そのため、学生にとって波動は物理学の中でも

難解な分野です。そこで我々は、摩擦のない平面を用いることで、ゆっくり進む波を作ることを考案しました。これによって生徒は楽しみながら、目で見て確実に納得しながら学習することができます。

微小プラスチック製ビーズ（直径約0.3mmの球）をホワイトボード(900mm×3000mm)上に適量な密度で散布し、摩擦のない平面を作ります（図35）。プラスチック製の薄いフタ（直径約50mm、重さ4.15g）の側面に穴を開け、細いゴムヒモで長く繋ぎ合せて“波伝播ヒモ”とし、摩擦のない平面上に置きます。このプラスチック

のフタは軽く、摩擦はほとんどないので、波はエネルギーを

失うことなく長い距離伝播できます。波の位相の違いや速度の違いを比較する際には、2本の色の異なる波伝播ヒモを置きます。



波伝播ヒモを用いる波動実験装置

ふくい科学学園のホームページ (<http://fukuikagakugakuen.com/>) のトップページに
＜教材開発に関する動画＞：“ゆっくり進む波の動画”がありますのでご覧ください。

- ・自由端反射、固定端反射、定常波、同位相の波の重ね合わせ、逆位相の波の重ね合わせ、速度の異なる波

9. 簡易ビーズ板製作（特許がありますが、販売しなければ問題ありません）

・軽量（約2.5 kg）で生徒のグループ実験に十分使える簡易型摩擦の装置の簡単な紹介をします。

＜材料＞

- ① コルクボード：60cm x 90cm（平面度良好）
（DCM ホールディング株式会社（1097円））
- ② サンデーシート（硬質塩化ビニール板）：510
青色透明 910x600x1mm（2100円）
- ③ スタイロフォーム：30mm厚、約 700円
- ④ ブラタン：910 x 910：約 600円

＜手順＞

- ① コルクボードの裏側にブラタンを両面テープで貼る
- ② さらにブラタンにスタイロフォームを両面テープで貼る
- ③ サンデーシートに黒太マジックで碁盤の線（15cmおきき）を入れる
- ④ 黒線の上に幅の狭い両面テープ（5mm幅）を貼る「。
- ⑤ サンデーシートをコルクボードに貼る
- ⑥ コルクボードの木の枠にABSモール（ELPX1222-9）を貼り、その横にクッションを貼る。



簡易型ビーズ板

ビーズ板の平面度は大変重要です。ビーズの面が十分な平面精度を持っているかどうかは、その面での反射像が曲がったり、うねっていないかをチェックしてください！