

La física del ping-pong

Ricard Alert Zenón

`ricard.alert.zenon@gmail.com`

Institut Pere Vives Vich, Igualada

Facultat de Física de la Universitat de Barcelona

Trabajo de investigación de Bachillerato

Dirigido por Ernest Fabregat Soler

Cursos 2005-2007

Índice general

1 Introducción

2 El rebote

- Dinámica del rebote vertical unidimensional
- Dinámica del rebote horizontal bidimensional
- Cinemática del rebote vertical unidimensional

3 El efecto

- Contacto con una superficie
- Trayectoria en el aire. Efecto Magnus

4 Conclusiones y perspectivas

Capítulo

1 Introducción

2 El rebote

- Dinámica del rebote vertical unidimensional
- Dinámica del rebote horizontal bidimensional
- Cinemática del rebote vertical unidimensional

3 El efecto

- Contacto con una superficie
- Trayectoria en el aire. Efecto Magnus

4 Conclusiones y perspectivas

Objetivos y motivación. Qué hacer y por qué

Objetivos

- Descripción física del juego

Motivación

- Combinación de dos de mis aficiones
- Originalidad (hoy ya se ha tratado el tema al menos en dos trabajos de investigación más, en su día era inédito)
- Especial incidencia de la física en el ping-pong:
 - ▶ tamaño y masa de la pelota $\Rightarrow$ grandes velocidades (translación) i efectos (rotación)
 - ▶ cantidad, diversidad y complejidad de los materiales involucrados
 - ▶ dicen que es el deporte no motorizado más rápido del mundo

Objetivos y motivación. Qué hacer y por qué

Objetivos

- Descripción física del juego

Motivación

- Combinación de dos de mis aficiones
- Originalidad (hoy ya se ha tratado el tema al menos en dos trabajos de investigación más, en su día era inédito)
- Especial incidencia de la física en el ping-pong:
 - ▶ tamaño y masa de la pelota $\Rightarrow$ grandes velocidades (translación) i efectos (rotación)
 - ▶ cantidad, diversidad y complejidad de los materiales involucrados
 - ▶ dicen que es el deporte no motorizado más rápido del mundo

Metodología. Cómo hacerlo

Reduccionismo

- 1 Detección de los mecanismos básicos y sencillos que gobiernan un fenómeno físico complejo
- 2 Descripción de estos mecanismos básicos
- 3 Integración de los mecanismos básicos para explicar el fenómeno complejo

En el caso de la física del ping-pong, los mecanismos básicos son sólo dos: el rebote y el efecto.

Método de investigación

- 1 Experimento o hecho empírico a explicar
- 2 Teoría (varios aspectos de la mecánica clásica newtoniana)
- 3 Conclusiones

Metodología. Cómo hacerlo

Reduccionismo

- 1 Detección de los mecanismos básicos y sencillos que gobiernan un fenómeno físico complejo
- 2 Descripción de estos mecanismos básicos
- 3 Integración de los mecanismos básicos para explicar el fenómeno complejo

En el caso de la física del ping-pong, los mecanismos básicos son sólo dos: el rebote y el efecto.

Método de investigación

- 1 Experimento o hecho empírico a explicar
- 2 Teoría (varios aspectos de la mecánica clásica newtoniana)
- 3 Conclusiones

Capítulo

1 Introducción

2 El rebote

- Dinámica del rebote vertical unidimensional
- Dinámica del rebote horizontal bidimensional
- Cinemática del rebote vertical unidimensional

3 El efecto

- Contacto con una superficie
- Trayectoria en el aire. Efecto Magnus

4 Conclusiones y perspectivas

Sección

1 Introducción

2 El rebote

- Dinámica del rebote vertical unidimensional
- Dinámica del rebote horizontal bidimensional
- Cinemática del rebote vertical unidimensional

3 El efecto

- Contacto con una superficie
- Trayectoria en el aire. Efecto Magnus

4 Conclusiones y perspectivas

Experimento

Procedimiento

Medida de la altura de la pelota en función del tiempo en rebotes verticales sucesivos en caída libre (pelota *Nittaku**** sobre una superficie de caucho sintético)

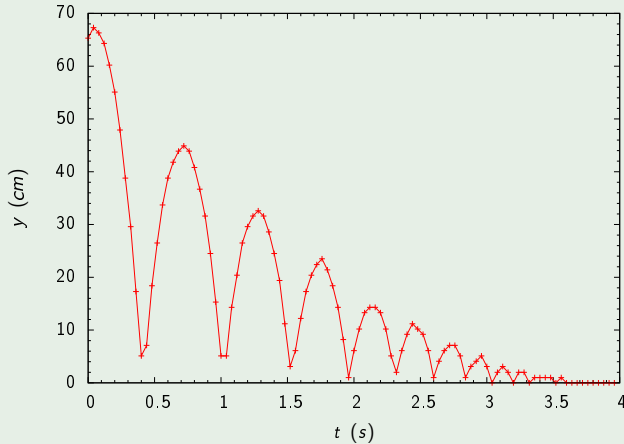
Instrumentación

- Sensor de posición *MultiLog Pro* (25 Hz)
- Programario *MultiLab*



Experimento

Resultados



Teoría

Disipación de energía en el rebote

- Fricción del aire despreciable (se comprueba que es una muy buena aproximación)
- Disipación energética asociada casi totalmente al choque inelástico
- Propuesta de un modelo simple

$$zE_i = E_f; \quad z \equiv \text{factor de conservación energético} \quad (1)$$

$$z(U_i + T_i) = U_f + T_f \quad (2)$$

$$zmgh_i = mgh_f \implies z = \frac{h_f}{h_i} \quad (3)$$

- Limitaciones del modelo: se observa dependencia $z = z(E_i)$

Teoría

Coeficiente de restitución

Reformulación en términos del coeficiente de restitución de un choque (ε)

$$\varepsilon \equiv \frac{|\vec{p}_{s,CM}|}{|\vec{p}_{e,CM}|} \quad (\text{Newton}) \quad (4)$$

$$\text{Choque unidimensional pelota-Tierra} \implies \varepsilon = \frac{v_s}{v_e} \quad (5)$$

Conservación de la energía mecánica en el aire

$$\frac{mv_e^2}{2} = mgh_i, \quad \frac{mv_s^2}{2} = mgh_f \implies \frac{v_e^2}{v_s^2} = \frac{h_i}{h_f} \implies \varepsilon = \sqrt{z} \quad (6)$$

ε i z aportan la misma información

Conclusiones

Características de la pelota. Modelo elástico

- Mayor pérdida de energía a mayor diámetro (justificación del aumento de tamaño para la ralentización del juego)
- Modelo elástico del choque pelota-superficie (ley de Hooke)

$$F = \frac{dp}{dt} = YS \frac{\delta L}{L} \equiv k\delta L \quad (7)$$

$Y \equiv$ módulo de Young (propiedad intrínseca de los materiales)
Consideremos:

- ▶ Dos pelotas de tamaño distinto que caen desde la misma altura (igual Δp)
- ▶ Tiempo de parada en el choque (Δt) independiente del tamaño de la pelota (L)
- ▶ Superficie de contacto S independiente del tamaño de la pelota

Conclusiones

Características de la pelota. Modelo elástico

- Mayor pérdida de energía a mayor diámetro (justificación del aumento de tamaño para la ralentización del juego)

$$F = \frac{dp}{dt} \approx \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad \text{independiente del tamaño} \quad (8)$$

$$\frac{\delta L_{\text{grande}}}{L_{\text{grande}}} = \frac{\delta L_{\text{pequeña}}}{L_{\text{pequeña}}} \implies \delta L_{\text{grande}} > \delta L_{\text{pequeña}} \quad (9)$$

$$E_e = E_i - E_f = mg(h_i - h_f) = \frac{k(\delta L)^2}{2} = \frac{F}{2}\delta L \quad (10)$$

$$E_{e,\text{grande}} > E_{e,\text{pequeña}} \quad (11)$$

Conclusiones

Características de la pala. Modelo elástico

- Mayor pérdida de energía a mayor grosor de la esponja: aumento de L
- Menor pérdida de energía con las antiguas colas rápidas: aumento de Y
- Mayor pérdida de energía a mayor flexibilidad de la goma: disminución de Y (sistemas como el *High Tension* de *Butterfly* tratan de minimizar este efecto)
- Mayor control a mayor flexibilidad de la goma y/o mayor grosor de la esponja: proporcionado por la mayor deformación δL

Se precisa un balance entre los distintos aspectos

Sección

1 Introducción

2 El rebote

- Dinámica del rebote vertical unidimensional
- **Dinámica del rebote horizontal bidimensional**
- Cinemática del rebote vertical unidimensional

3 El efecto

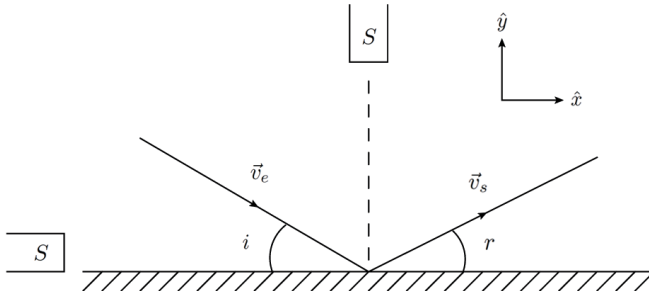
- Contacto con una superficie
- Trayectoria en el aire. Efecto Magnus

4 Conclusiones y perspectivas

Experimento

Procedimiento

Medida de la velocidad antes i después del choque asumiendo movimiento rectilíneo uniforme en la décima de segundo anterior y posterior al choque



Experimento

Instrumentación

- Sensor de posición *MultiLog Pro*
- Programario *MultiLab*

Resultados

$$v_{e,x} = 0.21 \pm 0.07 \text{ m/s}, \quad v_{e,y} = -1.63 \pm 0.07 \text{ m/s} \quad (12)$$

$$v_{s,x} = 0.20 \pm 0.07 \text{ m/s}, \quad v_{s,y} = 0.92 \pm 0.07 \text{ m/s} \quad (13)$$

$$\varepsilon = 0.57 \pm 0.04 \quad (14)$$

$$i = \arctan \frac{|v_{e,y}|}{|v_{e,x}|} = 83 \pm 2^\circ, \quad r = \arctan \frac{|v_{s,y}|}{|v_{s,x}|} = 78 \pm 4^\circ \quad (15)$$

Teoría

Ángulos de incidencia y de reflexión

El ángulo de reflexión no coincide con el de incidencia ($r \neq i$) debido a la inelasticidad del choque

La relación $v_{e,x} \approx v_{s,x}$ encontrada experimentalmente lleva a pensar en determinar r a partir de ε para un cierto i

$$\varepsilon = \frac{|\vec{v}_s|}{|\vec{v}_e|} = \frac{\sqrt{v_{s,x}^2 + v_{s,y}^2}}{\sqrt{v_{e,x}^2 + v_{e,y}^2}} = \frac{|v_{s,x}| \sqrt{1 + \tan^2 r}}{|v_{e,x}| \sqrt{1 + \tan^2 i}} \approx \sqrt{\frac{1 + \tan^2 r}{1 + \tan^2 i}} \quad (16)$$

$$r \approx \arctan \sqrt{\varepsilon^2 (1 + \tan^2 i) - 1}; \quad \varepsilon > \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 i}} \quad (17)$$

Cabe notar que $r(\varepsilon = 1) = i$ tal como se esperaba

Conclusiones

Ángulos de incidencia y de reflexión

- La disipación energética en el contacto pelota-superficie produce una pérdida de ángulo de reflexión (se ha estudiado una situación sobre un plano horizontal, sin acción de la gravedad, y sin efecto)
- En una pala en reposo la principal fuente de la disipación es la deformación elástica en la dirección perpendicular a la pala y no la fricción tangencial
- Podemos determinar el ángulo de reflexión a partir del de incidencia si conocemos el coeficiente de restitución del sistema pelota-superficie

Sección

1 Introducción

2 El rebote

- Dinámica del rebote vertical unidimensional
- Dinámica del rebote horizontal bidimensional
- Cinemática del rebote vertical unidimensional

3 El efecto

- Contacto con una superficie
- Trayectoria en el aire. Efecto Magnus

4 Conclusiones y perspectivas

Experimento

Procedimiento

Medida de la altura de la pelota en función del tiempo en rebotes verticales sucesivos en caída libre (pelota *Nittaku**** sobre una superficie de caucho sintético)

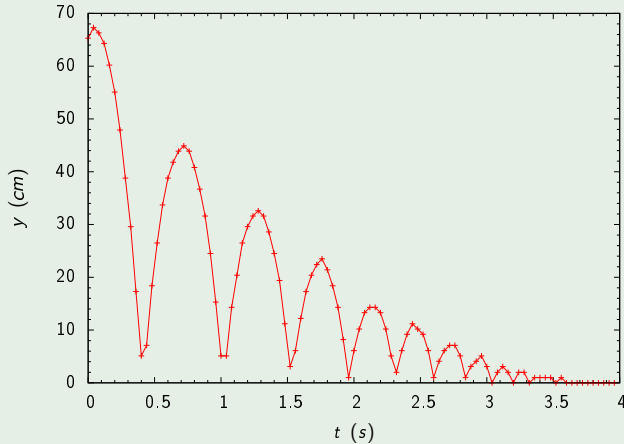
Instrumentación

- Sensor de posición *MultiLog Pro* (25 Hz)
- Programario *MultiLab*



Experimento

Resultados



Teoría

Altura de la pelota en función del tiempo $y(t)$

Caída libre con $y_{0,n} = 0$

$$y(t) = v_n(t - t_{n-1}) - \frac{g(t - t_{n-1})^2}{2} \equiv v_n \tilde{t}_n - \frac{g \tilde{t}_n^2}{2} \quad (18)$$

$y_{0,n} \equiv$ posición inicial del rebote n

$v_n \equiv$ velocidad inicial del rebote n

$t_n \equiv$ tiempo total transcurrido una vez completado el rebote n

$\tilde{t}_n \equiv$ tiempo transcurrido desde el inicio del rebote n

Tenemos que determinar $n = n(t)$. Calcularemos t_n e invertiremos

$$t_n = \sum_{k=0}^n T_k; \quad T_k \equiv \text{duración del rebote } k \quad (19)$$

Teoría

Altura de la pelota en función del tiempo y (t)

Consideremos ε independiente del rebote, esto es, de la energía

$$T_k = 2\sqrt{\frac{2h_k}{g}} = 2\varepsilon^k \sqrt{\frac{2h_0}{g}} \equiv T_0 \varepsilon^k \quad (20)$$

Suma de la progresión geométrica

$$t_n = \sum_{k=0}^n T_k = T_0 \frac{1 - \varepsilon^{n+1}}{1 - \varepsilon} \Rightarrow t_{n-1} = T_0 \frac{1 - \varepsilon^n}{1 - \varepsilon} \quad (21)$$

Teoría

Altura de la pelota en función del tiempo $y(t)$

Invertimos la función para encontrar $n(t)$

$$n = \frac{\ln \left(1 - (1 - \varepsilon) \frac{t_{n-1}}{T_0} \right)}{\ln \varepsilon} \quad (22)$$

Si sustituímos $t_{n-1} \rightarrow t$ sólo hará falta añadir una función parte entera (función suelo)

$$n = \left\lfloor \frac{\ln \left(1 - (1 - \varepsilon) \frac{t}{T_0} \right)}{\ln \varepsilon} \right\rfloor \quad (23)$$

Teoría

Altura de la pelota en función del tiempo $y(t)$

Las velocidades iniciales son

$$v_n = \varepsilon^n \sqrt{\frac{gh_0}{2}} \quad (24)$$

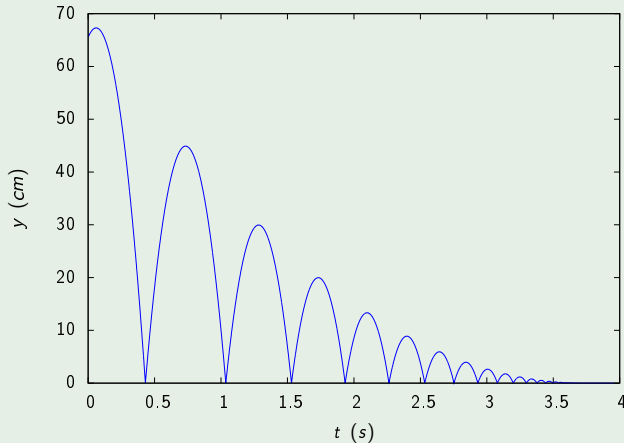
Finalmente

$$y(t) = \sqrt{\frac{gh_0}{2}} \varepsilon^n \tilde{t}_n - \frac{g \tilde{t}_n^2}{2} \quad (25)$$

- Hemos obtenido una expresión analítica para la altura de la pelota en cualquier instante teniendo en cuenta los rebotes
- Sólo hace falta conocer la altura inicial h_0 , la gravedad g y el coeficiente de restitución ε

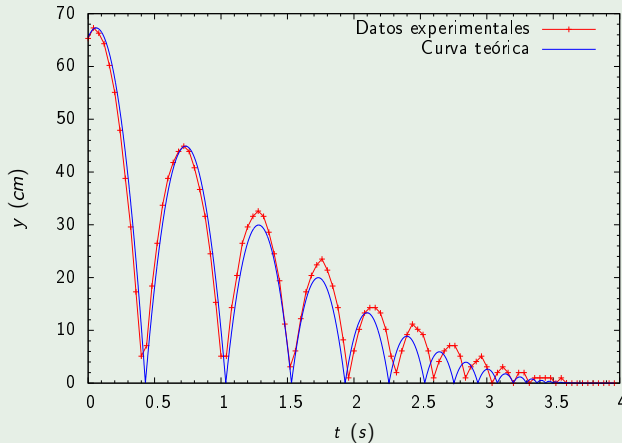
Conclusiones

Curva teórica de la altura $y(t)$



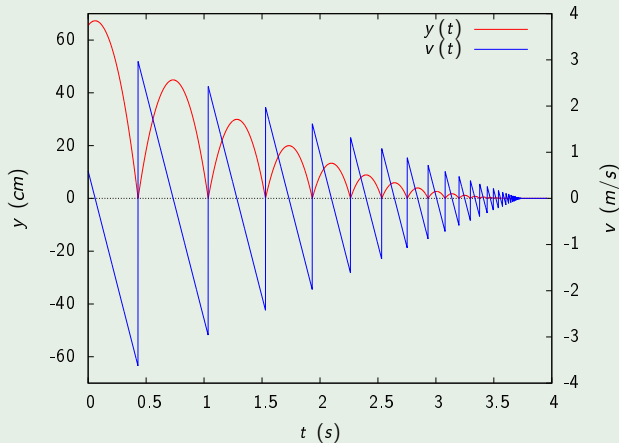
Conclusiones

Comparación teoría-experimento de la altura $y(t)$



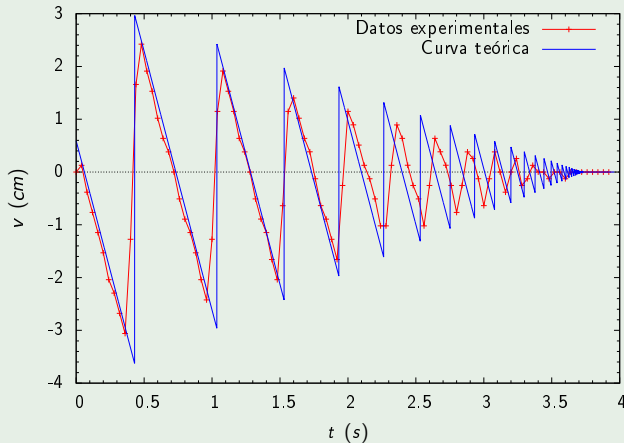
Conclusiones

Curvas teóricas de la altura $y(t)$ y la velocidad $v(t)$



Conclusiones

Comparación teoría-experimento de la velocidad $v(t)$



Capítulo

1 Introducción

2 El rebote

- Dinámica del rebote vertical unidimensional
- Dinámica del rebote horizontal bidimensional
- Cinemática del rebote vertical unidimensional

3 El efecto

- Contacto con una superficie
- Trayectoria en el aire. Efecto Magnus

4 Conclusiones y perspectivas

Sección

1 Introducción

2 El rebote

- Dinámica del rebote vertical unidimensional
- Dinámica del rebote horizontal bidimensional
- Cinemática del rebote vertical unidimensional

3 El efecto

- Contacto con una superficie
- Trayectoria en el aire. Efecto Magnus

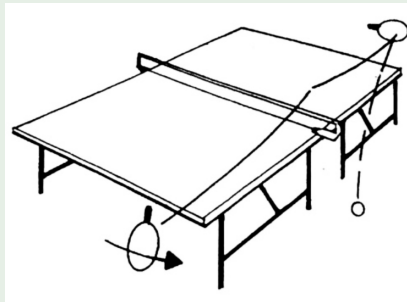
4 Conclusiones y perspectivas

Experimento

Evidencia empírica

Las pelotas con efecto rebotan de forma diferente de las que no llevan

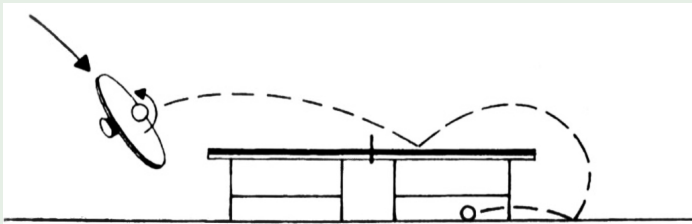
- Efecto lateral: una pelota con efecto lateral rebota en un plano diferente del de incidencia (se va hacia los lados)



Experimento

Evidencia empírica

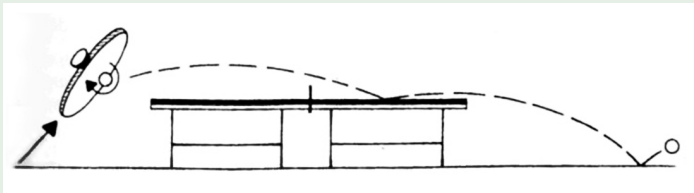
- Efecto cortado: una pelota cortada rebota en un ángulo de reflexión mayor que el de una pelota sin efecto (se eleva en contactar con la mesa hasta conseguir el retroceso y se va abajo en contactar con la pala)



Experimento

Evidencia empírica

- Efecto liftado: una pelota liftada rebota en un ángulo de reflexión menor que el de una pelota sin efecto (se va abajo en contactar con la mesa i se eleva en contactar con la pala)

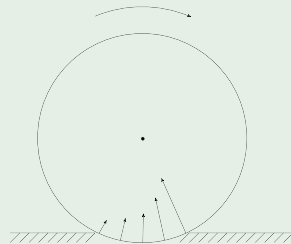


Teoría

Modelo de la rodadura

Consideremos una pelota con efecto que cae verticalmente sobre una superficie

- En el momento del contacto, el efecto crea una asimetría en la presión que recibe la región de contacto de la pelota. El origen de esta asimetría es la respuesta viscoelástica de los materiales, que se deforman más rápidamente que recuperan su forma inicial (histéresis elástica)



Teoría

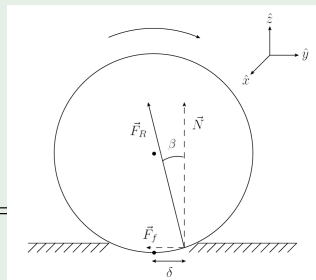
Modelo de la rodadura

- La fuerza resultante $\vec{F}_R$ está desplazada δ del punto central del contacto $\Rightarrow$ crea un momento de fuerza $\vec{M}_{\text{rel}}$

$$\begin{aligned}\vec{M}_{\text{rel}} &= \vec{r} \times \vec{F}_R \approx \delta F_R \sin\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) \hat{x} = \\ &= \delta F_R \cos \beta \hat{x} = \delta N \hat{x} \quad (26)\end{aligned}$$

- La componente tangencial de $\vec{F}_R$ crea una pequeña fricción

$$\vec{F}_f = -F_R \sin \beta \hat{y} = \frac{N}{\cos \beta} \sin \beta \hat{y} = -N \tan \beta \hat{y} \equiv -\mu N \hat{y} \quad (27)$$



Teoría

Modelo de la rodadura

- Un momento de fuerza $\vec{M}$ produce un cambio en el momento angular $\vec{L}$

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt} \quad (28)$$

Separación del momento angular

$$\begin{aligned} \vec{L} &= \sum_{i=1}^N \vec{r}_i \times \vec{p}_i = \sum_{i=1}^N (\vec{r}_{CM} + \vec{r}_i') \times m_i (\vec{v}_{CM} + \vec{v}_i') = \\ &= \sum_{i=1}^N \vec{r}_i' \times \vec{p}_i' + \vec{r}_{CM} \times \vec{p}_{CM} \equiv \vec{L}_{\text{rel}} + \vec{L}_{CM} \end{aligned} \quad (29)$$

Teoría

Modelo de la rodadura

- El momento de fuerza $\vec{M}_{\text{rel}}$ modifica el momento angular $\vec{L}_{\text{rel}}$ (es interno)

$$\vec{L}_{\text{rel}}^f \approx \vec{L}_{\text{rel}}^i + \tau \vec{M}_{\text{rel}} \quad (30)$$

$\tau \equiv$ tiempo de contacto

Momento de inercia I de la pelota (cáscara esférica)

$$\vec{L}_{\text{rel}}^i = I \vec{\omega}_i = -\frac{2mR^2}{3} \omega_i \hat{x} \quad (31)$$

$$\vec{L}_{\text{rel}}^f \approx -\frac{2mR^2}{3} \omega_i \hat{x} + \tau \delta N \hat{x} \equiv -\frac{2mR^2}{3} \omega_f \hat{x} \quad (32)$$

Teoría

Modelo de la rodadura

- La pelota rebota con menor efecto

$$\omega_f \approx \omega_i - \frac{3\tau\delta N}{2mR^2} \quad (33)$$

- El momento angular total se conserva de manera aproximada

$$\vec{L}^f = \vec{L}_{\text{rel}}^f + \vec{L}_{\text{CM}}^f \approx \vec{L}^i = \vec{L}_{\text{rel}}^i \quad (34)$$

- La pelota rebota con un momento angular orbital que la desvía hacia la dirección observada empíricamente

$$\vec{L}_{\text{CM}}^f \approx -\tau\delta N\hat{x} \quad (35)$$

Conclusiones

Características de la pelota

- Menor efecto a mayor diámetro (justificación del aumento de tamaño para la ralentización del juego)

Si contactamos la pelota tangencialmente con una fuerza $\vec{F} = F_t \hat{\theta}$ durante un tiempo τ (coordenadas cilíndricas de la pelota)

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} = \frac{d\vec{L}}{dt} \implies \vec{L} = \int_0^\tau R F_t \hat{z} dt = \tau R F_t \hat{z} \quad (36)$$

Momento de inercia I de la pelota (cáscara esférica)

$$\vec{L} = \frac{2mR^2}{3} \vec{\omega} \implies \vec{\omega} = \frac{3\tau F_t}{2mR} \hat{z} \quad (37)$$

Conclusiones

Características de la pala

- Mayor efecto a mayor flexibilidad de la goma y/o mayor grosor de la esponja: aumento del coeficiente de rodadura δ
- Mecanismos de acción de las gomas de picos:
 - ▶ disminución de la superficie de contacto $\Rightarrow$ menor adherencia $\Rightarrow$ menor efecto (más pronunciado a menor superficie de los picos)
 - ▶ deformación asimétrica de los picos, aplastados en el lado de ataque pero doblados en el lado contrario. La restitución elástica de esta deformación puede invertir el efecto (más pronunciado a mayor longitud de los picos)

Sección

1 Introducción

2 El rebote

- Dinámica del rebote vertical unidimensional
- Dinámica del rebote horizontal bidimensional
- Cinemática del rebote vertical unidimensional

3 El efecto

- Contacto con una superficie
- Trayectoria en el aire. Efecto Magnus

4 Conclusiones y perspectivas

Experiment

Procedimiento

- Medida directa del ángulo de desviación de una pelota con efecto suspendida en un péndulo en un flujo de aire (trigonometría y escala sobre una fotografía), φ_d
- Medida del ángulo de desviación de una pelota con efecto suspendida en un péndulo en un flujo de aire según la teoría de Magnus, φ_t
 - ▶ Medida de la velocidad del aire (anemómetro), u
 - ▶ Medida de la velocidad de rotación de la pelota (vídeo), v

Instrumentación

- Cuerda, hilo de nylon, pinza
- Ventilador
- Cámara fotográfica y de vídeo

Experimento

Resultados

- Medida directa

$$\varphi_d = \arcsin \frac{x + R}{a} = 3.4 \pm 0.2^\circ \quad (38)$$

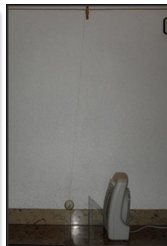
$x \equiv$ separación del péndulo de la vertical

$a \equiv$ longitud del péndulo

- Medida indirecta

$$u = 2.5 \pm 0.1 \text{ m/s} \quad (39)$$

$$\nu = 2.00 \pm 0.06 \text{ Hz} \quad (40)$$



Cargando

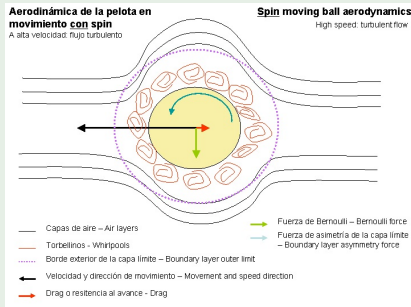
Teoría

Efecto Magnus

Teorema de Kutta-Joukowski:
 resolución del problema de un cuerpo cualquiera sometido a un flujo $\vec{u}$ bidimensional ideal, estacionario, incompresible y con vorticidad $\vec{\Gamma}$ (sigue siendo potencial o irrotacional)

$$\vec{F}_M = \rho \vec{u} \times \vec{\Gamma} \quad \text{Fuerza de Magnus sobre el cuerpo} \quad (41)$$

$\rho \equiv$ densidad del fluido



Teoría

Efecto Magnus

Interpretación física:

agarre del fluido al cuerpo

⇒ diferencia de velocidad

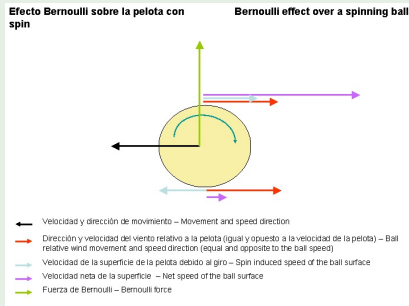
⇒ diferencia de presión P

⇒ fuerza

Teorema de Bernoulli

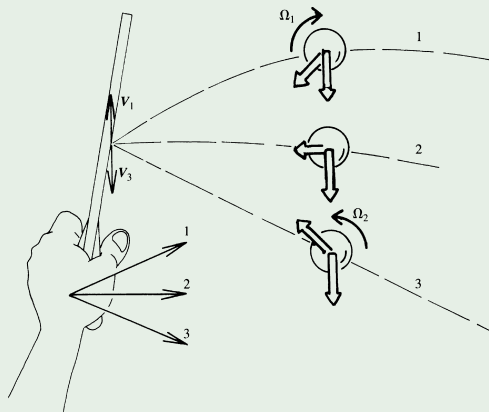
$$\vec{\nabla} \left(P + \frac{\rho u^2}{2} \right) = \vec{0} \quad (42)$$

- Turbulencia en la capa límite ⇒ disminución del agarre ⇒ disminución del efecto Magnus y de la resistencia aerodinámica (pelotas de golf)



Conclusiones

Trayectoria de las pelotas con efecto

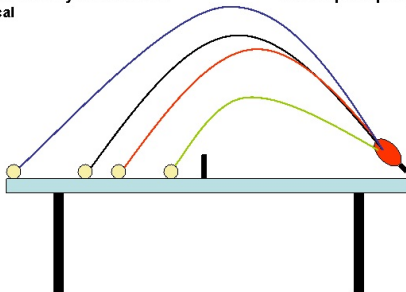


Conclusiones

Trayectoria de las pelotas con efecto

Proyección de las trayectorias en el plano vertical

Vertical plane path projection



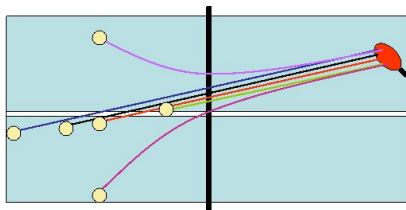
- Trayectoria ideal (parábola balística sin rozamiento) – Ideal path (ballistic parabola)
- Trayectoria real en el aire (rozamiento): sin top/back spin, con o sin spin lateral – Real path with friction, no top/back spin, with or without lateral spin
- Trayectoria con top spin – Path with top spin
- Trayectoria con back spin – Path with back spin

Conclusiones

Trayectoria de las pelotas con efecto

Proyección de las trayectorias en el plano horizontal

Horizontal plane path projection



- Trayectoria ideal (parábola balística sin rozamiento) – Ideal path (ballistic parabola, no friction)
- Trayectoria real en el aire (con rozamiento) sin spin – Real path with friction, no spin
- Trayectoria con top spin – Path with top spin
- Trayectoria con back spin – Path with back spin
- Trayectoria con spin lateral de derecha a izquierda, sin top/back spin – Path with lateral R to L spin, no top/back spin
- Trayectoria con spin lateral de izquierda a derecha, sin top/back spin – Path with lateral L to R spin, no top/back spin

Conclusiones

Comparación teoría-experimento

Adherencia $v_+ = u + v, \quad v_- = u - v; \quad v = \omega R = 2\pi\nu R \quad (43)$

Teorema de Bernoulli $\Delta P = \frac{\rho}{2} (v_+^2 - v_-^2) = 2\rho uv \quad (44)$

Fuerza de Magnus $F_M = S\Delta P = \pi R^2 \Delta P = 2\pi\rho uv R^2 \quad (45)$

Dinámica del péndulo $\varphi_t = \arctan \frac{F_M}{mg} = 4.3 \pm 0.6^\circ \quad (46)$

Resultado compatible con $\varphi_d = 3.4 \pm 0.2^\circ$

- La teoría de Magnus describe mínimamente bien incluso cuantitativamente la desviación de origen aerodinámico de las pelotas con efecto

Capítulo

1 Introducción

2 El rebote

- Dinámica del rebote vertical unidimensional
- Dinámica del rebote horizontal bidimensional
- Cinemática del rebote vertical unidimensional

3 El efecto

- Contacto con una superficie
- Trayectoria en el aire. Efecto Magnus

4 Conclusiones y perspectivas

Conclusiones generales

Satisfacción de los objetivos

Hemos podido describir los mecanismos físicos básicos que gobiernan los distintos fenómenos que se dan en el transcurso de las jugadas de ping-pong

- El rebote
 - ▶ Pérdida de energía en el rebote y su relación con las principales características de la pelota y de la pala
 - ▶ Pérdida de ángulo de reflexión en el rebote
 - ▶ Cinemática de una sucesión de rebotes verticales
- El efecto
 - ▶ Trayectorias que toman las pelotas con efecto al rebotar y su relación con las características de la pelota y de la pala
 - ▶ Trayectorias que toman las pelotas con efecto al desplazarse por el aire

Trabajos posteriores

La màgia dels efectes (La magia de los efectos)

Autor: Albert Martínez Vall

Instituto: Col·legi Sant Miquel dels Sants, Vic

Curso de presentación: 2009

Director: Miquel Padilla Muñoz

- Trata únicamente el tema del efecto pero con más detalle en el terreno experimental
- Se hacen experimentos de rebote bidimensional parecidos a los de nuestro trabajo pero con pelotas con efecto liftado y cortado y se comparan
- Se hacen simulaciones de la aerodinámica de la pelota

Trabajos posteriores

La física i el tennis taula (La física y el tenis de mesa)

Autor: Oriol Abante Alert

Instituto: Col·legi La Mercè, Martorell

Curso de presentación: 2011

Director: Josep Anton Garrido Alarcón

- Tratamiento genérico más enfocado a la vertiente deportiva (materiales y técnica del ping-pong)
- Hay un apartado dedicado a la biomecánica del ping-pong
- Se hacen experimentos sobre la resistencia de las gomas a la tracción
- Contiene una encuesta y dos entrevistas

Propuestas de estudio

Algunos temas susceptibles de ser tratados

- Mejora de la precisión y de la cantidad de todos los experimentos
- Profundización en el estudio de las propiedades elásticas de los materiales
- Verificación experimental cuantitativa del modelo de la rodadura
- Estudio detallado de los mecanismos de acción de las gomas de picos
- Profundización en el estudio de la aerodinámica de la pelota incluyendo el efecto de las turbulencias

Muchas gracias!

