

3 MOMEN ĐỘNG LƯỢNG

ĐỊNH LUẬT BẢO TOÀN MOMEN ĐỘNG LƯỢNG

I - MỤC TIÊU

- Hiểu được khái niệm momen động lượng là đại lượng động học đặc trưng cho chuyển động quay của một vật rắn quanh một trục.
- Hiểu định luật bảo toàn momen động lượng.
- Giải các bài toán đơn giản về momen động lượng và ứng dụng định luật bảo toàn momen động lượng.
- Vận dụng kiến thức để giải thích một số hiện tượng trong thực tế, biết các ứng dụng của định luật bảo toàn momen động lượng trong đời sống và kĩ thuật.

II - CHUẨN BỊ

Giáo viên

- GV có thể dùng các tư liệu, các ví dụ trong thực tế thông qua các hình vẽ, tranh ảnh minh họa về chuyển động quay của vật rắn (ảnh diễn viên xiếc nhào lộn, trượt băng nghệ thuật, vận động viên nhảy cầu, ném tạ xích...) để khai thác các kiến thức có liên quan đến bài học.

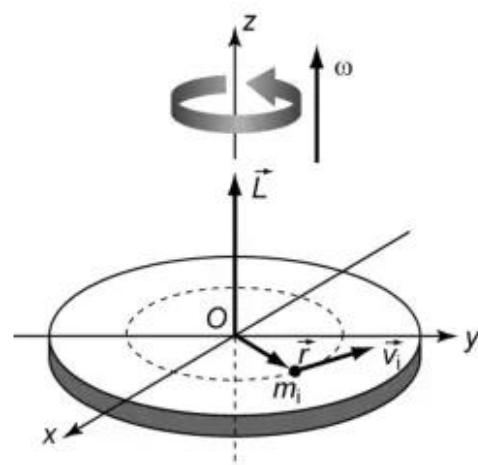
- GV hướng dẫn HS tự thực hiện các thí nghiệm đơn giản ở nhà có liên quan đến bài học.

Học sinh

- Ôn lại kiến thức động lượng và định luật bảo toàn động lượng ở Vật lí lớp 10.
- Tự thực hiện một vài thí nghiệm dễ làm ở nhà : Thí nghiệm với ghế xoay và hai quả tạ đôi, hoặc làm thí nghiệm với hai quả trứng (quả trứng sống và quả trứng luộc chín) để trả lời câu hỏi : Làm thế nào cho quả trứng đứng được trên mặt bàn ?

III - NHỮNG ĐIỀU CẦN LUU Ý

1. Trong các giáo trình Vật lí ở bậc đại học, cao đẳng, khái niệm momen động lượng được xem là một đại lượng vectơ ($\vec{L} = \vec{r} \wedge \vec{p}$), tương ứng với vectơ động lượng ($\vec{p} = m\vec{v}$) trong chuyển động tịnh tiến. Trong chuyển động quay của một vật rắn, mọi chất điểm m_i trên vật đều chuyển động trên những đường tròn trong những mặt phẳng vuông góc với trục Oz (Hình 3.1). Khi đó, momen động lượng của chất điểm m_i là một vectơ nằm trên trục Oz và có độ lớn là :



Hình 3.1

$$L_i = r_i m_i v_i = r_i m_i r_i \omega = m_i r_i^2 \omega$$

Momen động lượng \vec{L} của vật rắn là tổng các vectơ momen động lượng $\vec{L} = \sum_i \vec{L}_i$. Về độ lớn, ta có :

$$L = \sum_i L_i = \sum_i m_i r_i^2 \omega = I \omega$$

Tóm lại, vectơ momen động lượng của một vật rắn là :

$$\vec{L} = I \vec{\omega}$$

Vectơ \vec{L} cùng chiều với vectơ $\vec{\omega}$ và cũng là một vectơ nằm trên trục quay. Lấy đạo hàm theo thời gian của $\vec{L} = I \vec{\omega}$, ta được $\frac{d\vec{L}}{dt} = I \frac{d\vec{\omega}}{dt} = I \vec{\gamma}$ hay $\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}$. Khi $\vec{M} = \vec{0}$ ta suy ra $\vec{L} = \text{hằng số}$. Vì vậy, khi nói rằng tổng momen động lượng của

một hệ được bảo toàn thì có nghĩa cả độ lớn lăn phương, chiều của tổng momen động lượng được bảo toàn. Vì lí do giảm nhẹ nội dung, trong SGK chỉ đề cập đến sự bảo toàn về độ lớn momen động lượng. Tuy trình độ HS, GV có thể giới thiệu sơ lược "sự bảo toàn về hướng" của momen động lượng thông qua những ví dụ trong thực tế (như các con quay định hướng trên các tàu vũ trụ).

2. Đối với HS khá, GV có thể phân tích thêm ba trường hợp riêng của định luật bảo toàn momen động lượng như sau :

– *Trường hợp 1 : $M = 0 \Rightarrow L = \text{hằng số}$.*

Khi đó, nếu momen quán tính $I = \text{hằng số}$ thì vật (hay hệ vật) không quay, hoặc quay đều.

– *Trường hợp 2 : $M = 0 \Rightarrow L_1 = L_2$ hay $I_1\omega_1 = I_2\omega_2$.* Khi đó, nếu momen quán tính I tăng thì vật quay chậm lại, momen quán tính I giảm thì vật quay nhanh hơn. Ví dụ, khi vận động viên trượt băng đột ngột thu hai tay vào sát người, momen quán tính đối với trục quay giảm, người đó sẽ quay nhanh hơn trước.

– *Trường hợp 3 : $M = 0 \Rightarrow L = 0$ hay $I_1\omega_1 + I_2\omega_2 = 0$.*

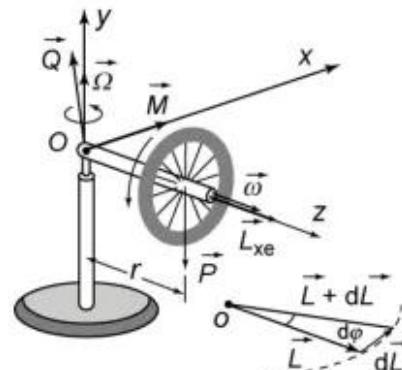
Khi đó, nếu một bộ phận của hệ quay theo một chiều thì bộ phận còn lại của hệ quay theo chiều ngược lại. Ví dụ : Ghế Gu-cốp-xki, máy bay trực thăng có hai hệ thống cánh quạt.

3. Sự tiến động của con quay hồi chuyển

Trong SGK Vật lí 12 nâng cao, phương trình $\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}$ chỉ mới áp dụng cho một số trường hợp đặc biệt, trong đó ta chỉ xét các vật rắn đối xứng đối với trục quay, còn trục quay thì có định hướng cố định. Trong những trường hợp đó, $\frac{d\vec{L}}{dt}$ và \vec{M} có cùng hướng với \vec{L} ; cả hai đại lượng này đều có phương trùng với trục quay.

Việc khảo sát chuyển động của con quay hồi chuyển sẽ cho ta thấy, khi đó \vec{M} không cùng phương với \vec{L} .

Con quay hồi chuyển đơn giản gồm một bánh xe gắn vào một cái cán làm trục quay của bánh xe (Hình 3.2). Đầu xa của trục (đầu O) được đặt trên một cái giá đỡ, sao cho trục này có thể quay tự do xung quanh giá đỡ.



Hình 3.2

– Nếu lúc đầu *bánh xe không quay* thì khi buông ra, bánh xe sẽ rơi xuống (tức là quay xung quanh trục Ox).

– Nếu lúc đầu *bánh xe đang quay nhanh* thì khi buông ra theo cùng một cách như trên, bánh xe không đổ xuống mà cùng với cán trục, quay xung quanh trục thẳng đứng Oy đi qua giá đỡ. Sự quay này của cả trục và bánh xe được gọi *sự tiến động*.

Ta hãy phân tích, tại sao bánh xe không đổ xuống khi nó quay, nhưng sẽ rơi xuống khi nó không quay.

Ngoại lực tác dụng lên hệ (bánh xe và trục của nó) gồm : trọng lực \vec{P} (đặt tại tâm bánh xe, hướng thẳng đứng xuống dưới) và lực \vec{Q} là phản lực của giá đỡ tác dụng lên trục tại điểm O (lực này có giá đi qua O nên có momen lực bằng 0). Do đó tổng momen ngoại lực tác dụng lên hệ đối với điểm O có độ lớn là :

$$M = Pr \quad (\vec{M} \text{ có hướng dọc theo trục } Ox, \text{ Hình 3.2})$$

Từ phương trình : $\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}$ ta suy ra : $d\vec{L} = \vec{M}dt$, như vậy độ biến thiên momen động lượng $d\vec{L}$ của hệ cũng hướng theo trục Ox .

– Khi bánh xe không quay, momen động lượng ban đầu của bánh xe $L_{xe} = 0$, nên khi được buông ra, tác dụng của momen ngoại lực \vec{M} dẫn đến sự thay đổi của momen động lượng $d\vec{L}$, cả \vec{M} và $d\vec{L}$ đều nằm dọc theo trục Ox , như vậy momen động lượng có độ lớn tăng dần nhưng vẫn có hướng dọc theo trục Ox , nghĩa là bánh xe và trục của nó phải quay quanh trục Ox , tức là bánh xe phải rơi xuống.

– Khi bánh xe đang quay nhanh, ngay từ đầu bánh xe đã có momen động lượng L_{xe} nằm dọc theo trục Oz . Khi ta buông tay ra, tác dụng của momen ngoại lực \vec{M} dẫn đến sự biến thiên của momen động lượng $d\vec{L}$ (dọc theo trục Ox), momen động lượng của hệ bây giờ là $\vec{L} + d\vec{L}$ nằm trong mặt phẳng Oxz , tạo với trục Oz một góc $d\varphi$, nghĩa là sau khoảng thời gian dt trục bánh xe đã tiến động một góc $d\varphi$, quanh trục thẳng đứng Oy . Do trục của bánh xe quay một góc $d\varphi$, so với trục Oz nên tổng momen ngoại lực \vec{M} cũng tạo một góc $d\varphi$, so với trục Ox , như vậy cả hai vectơ \vec{M} và \vec{L} liên tục quay xung quanh trục thẳng đứng Oy , nhưng \vec{M} luôn đi trước \vec{L} một góc 90° .

Ta có thể tìm được tốc độ góc tiến động Ω của con quay (hệ gồm bánh xe và trục của nó) xung quanh trục Oy như sau :

$$d\varphi = \frac{dL}{L} = \frac{Mdt}{I\omega} = \frac{mgL}{I\omega} dt$$

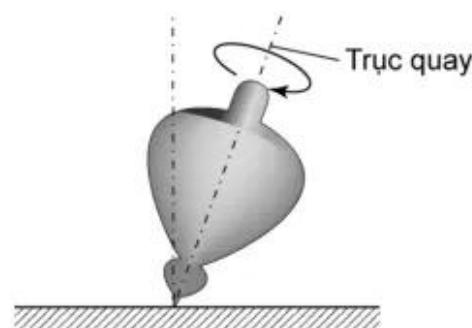
$$\text{Suy ra : } \Omega = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{mgL}{I\omega}$$

Với giả thiết $\Omega \ll \omega$, ta có thể xem momen động lượng của hệ $\vec{L} \approx \vec{L}_{xe} = I_z \vec{\omega}$ (I_z là momen quán tính của con quay đối với trục Oz), tức là khi momen ngoại lực tác dụng làm thay đổi \vec{L} , nó chỉ có thể làm thay đổi hướng của \vec{L} , chứ không làm thay đổi độ lớn của \vec{L} . Trên Hình 3.2, \vec{L} giữ nguyên độ lớn, đầu mút của vectơ \vec{L} đi theo một đường tròn và \vec{M} luôn luôn có phương tiếp tuyến với đường tròn đó. Vì \vec{L} phải luôn luôn hướng theo cán của con quay (hướng của trục Oz), nên cán cũng phải quay quanh trục thẳng đứng Oy theo chiều của \vec{M} . Như vậy, con quay phải tiến động thay vì đổ xuống.

Phương trình $\Omega = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{mgL}{I_z\omega}$ cũng áp dụng được nếu cán của con quay nghiêng một góc so với đường nằm ngang. Momen quán tính I_z và tốc độ góc ω càng lớn thì tốc độ góc của tiến động càng nhỏ.

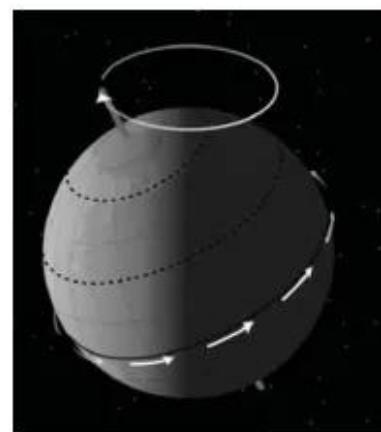
Sự tiến động có thể dễ dàng quan sát thấy ở con quay, đồ chơi quen thuộc của các bạn trẻ. Con quay có hình dạng đối xứng gần giống như chữ V (Hình 3.3). Đầu dưới của con quay được gắn với một đinh nhọn dùng làm điểm tựa. Khi quay, người chơi quấn một sợi dây ở đầu trên và giữ chặt một đầu dây, vừa rút dây vừa thả cho con quay chuyển động trên mặt đất. Con quay đậu khi trục quay thẳng đứng và hầu như không di chuyển.

Khi trục quay nghiêng, trọng lực kéo con quay xuống dưới. Tuy nhiên nó không đổ xuống mà vừa quay, vừa chuyển động quanh trục thẳng đứng. Lý do là vì con quay có một momen động lượng đối với trục đối xứng của nó, chuyển động quay quanh trục thẳng đứng là do tác dụng của trọng lực tạo ra một momen lực làm biến đổi momen động lượng của con quay, làm trục quay của nó chuyển động.



Hình 3.3. Chuyển động của con quay.

Trái Đất có thể coi như một con quay khổng lồ (Hình 3.4). Nó cũng có chuyển động tiến động. Trái Đất có dạng không hoàn toàn hình cầu và trục quay của Trái Đất nghiêng $66^{\circ}33'$ so với mặt phẳng hoàng đạo. Lực hấp dẫn của Mặt Trời lôi hai bán cầu Bắc và Nam của Trái Đất không đi qua khói tâm của Trái Đất nên tạo ra momen lực khiến trục Nam Bắc của Trái Đất quay quanh trục thẳng góc với mặt phẳng hoàng đạo. Kết quả là Trái Đất *tiến động rất chậm*, trục Nam Bắc của Trái Đất quay được một vòng sau 26 000 năm, nghĩa là thiên cực Bắc (giao điểm của trục Trái Đất và Bắc Thiên cầu) vạch nên một đường tròn trên nền trời sao trong thời gian đó, chứ không cố định ở vị trí sao Bắc Đẩu.



Hình 3.4. Sự tiến động của Trái Đất làm cho vị trí của điểm cực Bắc vũ trụ trên bầu trời không cố định.

IV - GỢI Ý VỀ PHƯƠNG PHÁP VÀ TỔ CHỨC HOẠT ĐỘNG DẠY HỌC

1. Momen động lượng

Ở phần đặt vấn đề, GV có thể cho HS quan sát hình vẽ (như Hình 3.1 trong SGK) hoặc cho HS xem các đoạn phim miêu tả tốc độ quay khác nhau của vận động viên trong quá trình nhảy cầu từ các video clip về Seagames, Olympic thể thao... GV có thể nêu câu hỏi : *Tại sao vận động viên có thể điều chỉnh tốc độ quay trong không trung mà không cần dựa vào bất kì một vật nào khác ?*

Để đi đến khái niệm momen động lượng, SGK đã chọn phương án tiếp cận khái niệm này bằng cách viết phương trình động lực học của vật rắn $M = I\gamma$ dưới dạng $M = I \frac{d\omega}{dt}$. Tiếp đó, GV gợi ý, nếu momen quán tính I của vật rắn không đổi thì phương trình trên có thể viết $M = \frac{d(I\omega)}{dt}$. Từ đây, nếu đặt $L = I\omega$ thì ta có

$$M = \frac{dL}{dt}.$$

Để giúp HS hiểu được ý nghĩa của đại lượng $L = I\omega$ trong chuyển động quay, GV có thể dùng gợi ý **C1**.

C1 GV gợi ý HS tìm ra mối liên hệ này từ Bảng 3.1 SGK. Đại lượng $L = I\omega$ trong chuyển động quay tương ứng với động lượng $p = mv$ trong chuyển động tịnh tiến. Vì thế ta gọi $L = I\omega$ là *momen động lượng* của vật rắn đối với trục quay.

GV hướng dẫn HS vận dụng công thức $L = I\omega$ thông qua câu hỏi **C2**.

C2 Momen động lượng của quả bowling đối với trực quay :

$$L = I\omega = 0,06 \cdot 40 = 2,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$$

2. Định luật bảo toàn momen động lượng

Trước khi giới thiệu định luật bảo toàn momen động lượng, GV nên xuất phát từ các ví dụ thực tế. Có thể đưa ra tình huống sau : *Tại sao tốc độ quay của Trái Đất hàng năm nay vẫn không thay đổi?* Từ các ví dụ thực tế, kết hợp với lí thuyết ở bài học, GV hướng dẫn để HS nắm được ý nghĩa cơ bản của định luật bảo toàn momen động lượng.

Từ phương trình $M = \frac{dL}{dt}$, nếu $M = \frac{dL}{dt} = 0$ thì $L = \text{hằng số}$. Đó là nội dung của định luật bảo toàn momen động lượng, phát biểu như sau : *Nếu tổng các momen lực tác dụng lên một vật rắn (hay hệ vật) đối với một trực bằng không, thì tổng momen động lượng của vật (hay hệ vật) đối với trực đó được bảo toàn.*

GV cần lưu ý HS rằng, trong trường hợp vật (hoặc hệ vật) có momen quán tính đối với trực quay thay đổi, ta có :

$$I_1\omega_1 = I_2\omega_2$$

trong đó $I_1\omega_1$ là momen động lượng của hệ lúc trước và $I_2\omega_2$ là momen động lượng của hệ lúc sau.

Cân lưu ý đến điều kiện áp dụng định luật bảo toàn momen động lượng. Cụ thể là : Xét xem momen các ngoại lực có cân bằng nhau không ? Trường hợp tổng momen các ngoại lực khác không, nhưng nếu khoảng thời gian tác dụng Δt nhỏ đến mức có thể bỏ qua xung của momen lực toàn phần $M\Delta t$, thì có thể coi momen động lượng của vật (hay hệ vật) là bảo toàn trong khoảng thời gian Δt đó.

Để giúp HS hiểu và biết cách vận dụng định luật bảo toàn momen động lượng, GV nêu câu hỏi **C3**.

C3 Lúc đầu ở tư thế dang hai tay ra, tốc độ góc của người có trị số là ω_1 thì khi người này co hai tay thu vào sát thân người, khoảng cách giữa các phần của người và khối tâm bị thu hẹp lại, momen quán tính của người đối với trực quay đi qua khối tâm giảm đi. Theo định luật bảo toàn momen động lượng, tốc độ góc của người tăng lên đến trị số ω_2 . Kết quả là người sẽ xoay nhanh hơn trước.

C4 Khi vận động viên nhảy cầu thực hiện động tác gập người và bó gối thì khoảng cách giữa các phần của người và khối tâm bị thu hẹp lại, momen quán tính của người đối với trực quay đi qua khối tâm giảm đi. Theo định luật bảo toàn momen động lượng thì tốc độ góc tăng lên, vận động viên xoay nhanh hơn trước.

Để củng cố bài học, GV hướng dẫn HS trả lời câu hỏi nêu ở đầu bài.

– Tuỳ theo trình độ HS, GV có thể giải thích thêm sự bảo toàn về hướng của momen động lượng, nghĩa là vật quay có xu hướng giữ nguyên hướng quay trong không gian. Điều này có nhiều ý nghĩa trong thực tế : giải thích được tại sao trực quay của Trái Đất luôn hướng về sao Bắc Đầu, chuyển động của con quay hâu như ổn định khi trực quay của nó thẳng đứng, vì sao đồng xu tung lên không kèm theo chuyển động quay sẽ rơi xuống ở tư thế khó xác định trước, ngược lại sẽ dễ dàng đón bắt đồng xu, nếu nó được truyền chuyển động quay khi ném ra...

V - HƯỚNG DẪN TRẢ LỜI CÂU HỎI VÀ GIẢI BÀI TẬP

Câu hỏi

1. Xem mục 2. Định luật bảo toàn momen động lượng (SGK).

2. Khi rời khỏi cầu nhảy, vận động viên có một tốc độ góc ban đầu ω_0 quanh một trục nằm ngang đi qua trọng tâm. Khi vận động viên thực hiện động tác "gập người và bó gối" thì khoảng cách giữa các phần của người và trọng tâm bị thu hẹp lại, momen quán tính của người đối với trục quay đi qua trọng tâm giảm đi. Vì trọng lực không gây ra momen quay quanh khối tâm nên momen động lượng của người được bảo toàn : $I_0\omega_0 = I\omega$. Kết quả là tốc độ góc ω tăng lên, vận động viên xoay nhanh hơn trước và thực hiện động tác nhào lộn trên không. Lúc sắp chạm mặt nước, người này phải tăng momen quán tính bằng cách "duỗi thẳng người" để giảm tốc độ góc. Nhờ vậy, vận động viên có thể lao xuống nước mà chỉ làm nước bắn toé ít.

Bài tập

1. D.

2. B.

3. A.

4. $L = I\omega = 0,75 \text{ kg.m}^2/\text{s}$.