

[www.mientayvn.com](http://www.mientayvn.com)

Đây là bản ghi lời giảng của giáo sư Walter Lewin trên Internet. Xem toàn bộ bài giảng này bạn có thể tìm thấy trên <http://www.mientayvn.com> > Học lý luận > Học vị n công nghệ Massachusetts > vật lý > cơ học cổ điển > chương VIII.

MIT OpenCourseWare

<http://ocw.mit.edu>

8.01 Physics I: Classical Mechanics, Fall 1999

Please use the following citation format:

Walter Lewin, *8.01 Physics I: Classical Mechanics, Fall 1999*. (Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare). <http://ocw.mit.edu> (accessed MM DD, YYYY). License: Creative Commons Attribution-Noncommercial-Share Alike.

Note: Please use the actual date you accessed this material in your citation.

For more information about citing these materials or our Terms of Use, visit:

<http://ocw.mit.edu/terms>

MIT OpenCourseWare  
<http://ocw.mit.edu>

8.01 Physics I: Classical Mechanics, Fall 1999  
Transcript – Lecture 8

Today we're going to talk about friction, something...  
Hôm nay chúng ta sẽ thảo luận về lực ma sát, một khái niệm....

[students murmuring]

Please, I have a terrible cold.

Vâng, tôi cảm thấy mệt mỏi vì cảm lạnh khi nói.

My voice is down.

Giọng của tôi thấp.

Help me to get through this with my voice—

Hãy giúp tôi hoàn thành bài học này với cái giọng nói này của tôi - -

thank you.

Cảm ơn.

We're going to talk about friction which we have never dealt with.

Chúng ta sẽ thảo luận về lực ma sát, cái mà tôi chưa bao giờ nói tới.

Friction is a tricky thing, not as easy as you may think.

Lực ma sát là một khái niệm rất tinh tế, có lẽ không dễ như chúng ta từng nghĩ.

I have an object on a horizontal surface.

Tôi có một vật nằm trên một mặt phẳng ngang.

The object has a mass,  $m$ , gravitational force,  $mg$ .

Vật có khối lượng  $m$ , trọng lực tác động lên nó là  $mg$ .

This is the  $y$  direction.

Đây là hướng  $y$ .

This could be the  $x$  direction.

Đây sẽ là hướng  $x$ .

There must be a force pushing upwards from the surface to cancel out  $mg$  because there's no acceleration in the  $y$  direction.

Phải có một lực đẩy lên phía trên để triệt tiêu  $mg$  vì không có gia tốc theo hướng  $y$ .

We normally call that the "normal force" because it's normal to this surface and it must be the same as  $mg$ .

Thông thường chúng ta gọi nó là lực pháp tuyến, nó vuông góc với bề mặt và trong trường hợp này nó phải có độ lớn bằng  $mg$ .

Otherwise there would be an acceleration in the y direction.

Nếu không nhẩy y sẽ có gia tốc theo hướng y.

Now I am going to push on this object with a force—

Bây giờ tôi sẽ đẩy vật này bằng một lực --

force Walter Lewin.

Lực Walter Lewin.

And we know that the object in the beginning will not start accelerating.

Và chúng ta biết rằng vật sẽ bắt đầu chuyển động.

Why is that? That's only possible because there is a frictional force which adjusts itself to exactly counter my force.

Tại sao? Đó chỉ có thể là do có lực ma sát tĩnh điều chỉnh liên tục cách chính xác với lực của tôi.

I push harder and harder and harder and there comes a time that I win and the object begins to accelerate.

Tôi càng đẩy mạnh và mạnh hơn và mạnh hơn thì lực ma sát sẽ xuất hiện vào lúc mà tôi thắng và vật bắt đầu chuyển động.

It means that the frictional force--

which is growing all the time as I push harder--

Có nghĩa là lực ma sát tĩnh liên tục trong suốt quá trình tôi đẩy mạnh hơn.

reaches a maximum value which it cannot exceed.  
t n giá tr c c i mà nó không th v t qua.

And that maximum value that the friction can achieve—

Và giá tr c c i mà l c ma sát có th t c - -

this is an experimental fact—

ây là m t d ki n th c nghi m - -

is what's called the friction coefficient mu which has no dimension, times this normal force.

b ng h s ma sát mu không có n v , nhân v i ph n l c này.

We make a distinction between static friction coefficients and kinetic.

Chúng ta c n phân bi t gi a h s ma sát t nh và h s ma sát ng.

This is to break it loose, to get it going.

Cái này làm cho v t lung lay, v t b t u chuy n ng.

This is to keep it going when it already has a certain velocity.

Cái này gi cho v t chuy n ng khi v t ã có v n t c nh t nh nào ó .

The static is always larger than the kinetic for reasons that are quite obvious.

H s ma sát t nh luôn luôn l n h n h s ma sát ng là i u hoàn toàn hi n nhiên.

It's a little harder to break it loose.

C n ph i y h i m nh h n v t lung lai.

Once it's going, it's easier to keep it going.

M t khi v t ã chuy n ng, s d duy trì chuy n ng ó h n.

It is fairly easy to measure a friction coefficient by putting an object on an incline and by changing the angle of the incline, increasing it.

Vì c o h s ma sát khá d b ng cách t v t trên m t m t ph ng nghiêng và thay i góc nghiêng, s làm nó t ng.

This is the angle alpha.

ây là góc alpha.

You increase it to the point that the objects start to slide down.

B n t ng nó cho n khi v t b t u tr t xu ng phía d i.

Here is the object.

ây là v t th .

This is the gravitational force, mg which I will decompose in two forces: one in the y direction—

ây là tr ng l c, mg tôi s phân tích nó thành hai thành ph n: m t thành ph n theo h ng y - -

which I always choose perpendicular to the surface—

Tôi luôn luôn ch n nó vuông góc v i b m t - -

and another one in an x direction.

Và thành phần còn lại theo hướng x.

You are free to choose this plus or this plus.

Bạn có thể chọn cái này là cộng hoặc cái này là cộng.

I will now choose this the plus direction.

Bây giờ tôi sẽ chọn đây là hướng cộng.

I am going to decompose them, so I have one component here and this component equals  $mg$  times the cosine of alpha.

Tôi sẽ phân tích chúng, vì vậy tôi có một thành phần này và thành phần này bằng  $mg$  nhân  $\cos$  alpha.

And I have a component in the x direction which is  $mg$  sine alpha.

Và tôi có thành phần theo hướng x bằng  $mg \sin$  alpha.

There is no acceleration in the y direction, so I can be sure that the surface pushes back with a normal force,  $N$  and that normal force  $N$  must be exactly  $mg \cos$  alpha because those are the only two forces in the y direction.

Không có gia tốc theo hướng y, vì vậy tôi có thể chắc chắn rằng bằng một lý do gì đó,  $N$  và thành phần  $N$  đó phải bằng  $mg \cos$  alpha vì đây là hai lực theo hướng y.

And there is no acceleration in the y direction so this one must be  $mg \cos$  alpha.

Và không có gia tốc theo hướng y vì vậy cái này phải bằng  $mg \cos$  alpha.

Now this object wants to slide downhill.

Bây giờ, vật thể này muốn trượt xuống dốc.

Friction prevents it from doing so so there's going to be a frictional force in this direction.

Lực ma sát ngăn cản nó làm như vậy vì vậy sẽ có lực ma sát theo hướng này.

And as I increase the tilt this frictional force will get larger and larger and larger and then there comes a time that the object will start to slide.

Và khi tôi tăng nghiêng  $\alpha$  ma sát này sẽ ngày càng lớn hơn và rồi sẽ ngừng lúc mà vật thì bắt đầu trượt.

Let us evaluate that very moment that it's just about to break loose.

Hãy tính góc nghiêng ngay lúc mà vật thì bắt đầu chuyển từ trạng thái nghỉ yên sang trạng thái chuyển động.

I'm applying Newton's Second Law.

Tôi sẽ áp dụng định luật II Newton.

In this direction, now, the acceleration is still zero but the frictional force has now just reached the maximum value—

Bây giờ, theo hướng này, gia tốc vẫn còn bằng 0 nhưng lực ma sát đã đạt đến giá trị cực đại—

because I increase alpha—

Vì tôi tăng  $\alpha$ —

so this component will get larger and this component will get larger.

Vì vậy thành phần này sẽ lớn hơn và thành phần này sẽ lớn hơn.

This component will get larger.

Thành phần này sẽ lớn hơn.

This component is still holding its own but then all of a sudden it can't grow any further and it starts to accelerate.

Thành phần này vẫn còn giữ nguyên giá trị của nó nhưng tình hình nó không thể tăng nữa và nó bắt đầu gia tốc.

So Newton's Second Law tells me that  $mg \sin \alpha$  minus  $F_f$  maximum at this point is zero.

Vì vậy định luật Newton II cho tôi biết rằng  $mg \sin \alpha - F_f$  cực đại tại thời điểm này bằng 0.

And this one is  $\mu$  static times  $N$ , which is  $mg \cos \alpha$ .

Và cái này là hệ số ma sát tĩnh nhân  $N$ , bằng  $mg \cos \alpha$ .

This one is  $mg \sin \alpha$ .

Cái này bằng  $mg \sin \alpha$ .

This equals zero.

Cái này bằng 0.

I lose my  $mg$ , and you see that  $\mu$  of  $s$  equals the tangent of  $\alpha$ .

Tôi mất  $mg$ , và bạn thấy rằng  $\mu$  bằng tang  $\alpha$ .

It's that easy to measure.

Cái đó rất dễ.

So you increase the tilt.

very bluntly nghiêng.

We will do that later until it starts to slip and then at that critical angle that it starts to slip you have a value for  $\mu$  of  $s$  for the static friction coefficient.

Chúng ta sẽ làm điều đó cho đến khi nó bắt đầu trượt và sau đó tại góc tới hạn mà nó bắt đầu trượt bạn có một giá trị duy nhất cho hệ số ma sát tĩnh.

It is very nonintuitive that this friction coefficient is completely independent of the mass.

Có một điều trái với trực giác của chúng ta là hệ số ma sát này hoàn toàn không phụ thuộc vào khối lượng.

The mass has disappeared.

Khối lượng biến mất.

Think about it—

Hãy nghĩ về điều này --

it's very nonintuitive.

Nó trái với trực giác.

If you double the mass, the angle would be the same given the fact that you have the same kind of object.

Nếu bạn tăng gấp đôi khối lượng của vật, góc tiếp xúc vẫn không thay đổi.

The friction coefficient only depends on the materials that you have the materials that are rubbing over each other.

Hệ số ma sát chỉ phụ thuộc vào loại vật liệu của hai bề mặt tiếp xúc với nhau.

It's also independent of the surface area that is in contact with this incline which is equally nonintuitive.

Nó cũng không phụ thuộc vào diện tích bề mặt tiếp xúc với mặt phẳng nghiêng này, điều này cũng trái với trực giác.

It's very nonintuitive, but we will see that that's quite accurate within the uncertainties that we can measure it.

Nó rất trái với trực giác, nhưng chúng ta sẽ thấy rằng điều đó hoàn toàn phù hợp với các phép đo thực nghiệm (trong phạm vi sai số của phép đo).

If you have a car and you park your car you throw it on the brakes and you put it at an angle and you increase the angle of the slope the friction coefficient for rubber on concrete is about one so the tangent is one, so the angle is about 45 degrees.

Nếu bạn có một chiếc xe hơi và bạn đỗ xe bên lề đường và bạn đặt nó trên một mặt phẳng nghiêng với góc nào đó và bạn tăng góc nghiêng hệ số ma sát của cao su trên bê tông là 1 vì vậy tang bằng 1, vì vậy góc khoảng 45 độ.

So if the road were 45 degrees, the car would start to slide independent of the mass of the car—

vì vậy nếu mặt đường nghiêng góc 45 độ, xe hơi sẽ bắt đầu trượt bất kể khối lượng của nó là bao nhiêu - -

no matter whether it's a truck or whether it is a small car—

Bất kể đó là xe tải hay chiếc xe hơi.

independent of the width of the tires.  
Không phụ thuộc vào độ rộng của lốp xe.

It doesn't enter into it even though you may think it does.  
Nó không phụ thuộc vào việc độ rộng của lốp xe này mặc dù có thể bạn nghĩ là nó phụ thuộc.

They would both start to slide at the same angle given the fact, of course the same road and the same kind of rubber.

Chúng sẽ bắt đầu trượt ở cùng góc độ bất kể, tất nhiên phụ thuộc cùng loại đường và cùng loại lốp xe.

I first want to show you some of this which is at first very qualitative.

Đầu tiên tôi muốn cho bạn biết một số điều rất định tính.

I don't want it to become quantitative yet.

Tôi chỉ muốn nó trở thành định tính.

The difficulty with these experiments are—

Khó khăn với những thí nghiệm này là - -

I'm going to use this plank here—

Tôi sẽ dùng tấm ván này đây - -

that the moment that my fingers touch this plank or touch the bottom of any of the objects that I'm going to slide, then all hell breaks loose.

Lúc mà ngón tay tôi chạm tấm ván này hoặc chạm phía dưới của bất kỳ vật thể nào mà tôi định cho nó trượt thì tình hình sẽ trở nên tồi tệ.

A little bit of water on the plank would locally make the friction coefficients larger.

Một ít nước trên tấm ván sẽ làm cho hệ số ma sát lớn hơn.

My fingers have chalk on them.

Trên các ngón tay của tôi có phấn.

A little bit of chalk on a local place would make the friction coefficient go down.

Một ít phấn ở nơi nào đó sẽ làm cho hệ số ma sát giảm.

That's why, at this point, we'll keep it a little qualitative.

ó là lí do t i sao, t i lúc này, chúng ta ch kh o sát nh tính.

The first thing I want to show you is, if I take a rubber puck and I put the rubber puck on this incline and I have a plastic bin--

Vì c u tiên tôi mu n ch cho b n là, n u tôi l y m t qu bóng cao su và tôi t qu bóng cao su này trên m t ph ng nghiêng này và tôi có m t thùng nh a.

this is quite smooth, I put it on here—

Cái này hoàn toàn tr n, tôi t nó lên ây - -

that it's immediately intuitive that the friction coefficient of this plastic bin will be lower than of the rubber puck.

Ngay l p t c tr c giác nói lên r ng h s ma sát c a thùng nh a này s nh h n a cao su.

So when I increase the angle, you expect that first the plastic bin will start to slide and then the rubber puck.

Vì v y khi tôi t ng góc, b n ngh u tiên thùng nh a s b t u tr t và sau ó n a cao su.

And if I gave you the angles at which that happens you could actually calculate the two values for the friction coefficient—

Và n u tôi cho b n góc mà các v t th b t u tr t b n có th tính toán c giá tr c a các h s ma sát - -

which I will not do now, but I will do that later.

Tuy nhiên tôi ch a làm i u ó bây gi mà tôi s làm sau

So all I want you to see—

Vì v y t c nh ng gì tôi mu n b n th y - -

I hope—

Tôi hi v ng - -

that this one will go earlier than that one.

R ng cái này s i tr c cái ó.

So I am going to increase the tilt... I do it very slowly.  
Vì vậy tôi sẽ tăng góc nghiêng...tôi làm rất chậm.  
I try not to... rock the boat too much, very slowly.  
Tôi cố gắng không xoay chuyển tình thế quá nhiều.  
We must be approaching the critical angle for the plastic.

Chúng ta phải tiến gần góc tới hạn của nhựa.

Boy, it's holding on to itself.

Các bạn, nó đang tự giữ nó.

There it goes... and the rubber goes a little later.  
y.....và cao su đi sau một chút.

The rubber can be made rough by rubbing it on one side in which case the angle will be even larger.

Cao su có thể làm nhám bằng cách chà nó một chút trong trường hợp đó góc sẽ lớn hơn.  
I told you that the friction coefficient is independent of the mass of the object.

Tôi có hai thùng nhựa giống nhau.

I have two identical bins here...

Tôi có hai thùng giống nhau đây.

well, as far as they can be identical.

, chúng giống nhau đến mức có thể.

Maybe one at the bottom is a little rougher than the other.

Có lẽ cái phía dưới hơi nhám hơn một chút so với cái kia.

But in one, I'm going to put 200 grams which is about five times the weight of the bin.

Nhưng trong một cái, tôi sẽ đặt 200 g để khoảng bằng 5 lần trọng lượng của thùng.

And then, within reason when I tilt them, they will go at the same angle because it's independent of the mass.

Và sau đó, theo lý luận khi tôi nghiêng chúng, chúng sẽ trượt đi cùng một góc vì nó không phụ thuộc vào khối lượng.

So let's try that again and see how close they are.

Vì vậy hãy thử lại và xem chúng gần nhau như thế nào.

It may be off by half a degree or one degree, of course because the plank is not uniform everywhere.

Có lẽ lệch khoảng nửa độ hoặc một độ, tất nhiên là vì tấm ván không đồng đều.

And now it's 18 degrees...19 ... 20... 20 ...

Và bây giờ nó là 18 ...19.5.....20.....20.5.....

21, and the other one is 21.2.

21, và cái còn lại là 21.2.

So they almost go at the same time, so you've seen that apparently the mass has very small if any effect.

Vì vậy chúng hầu như chuyển động cùng một lúc, vậy bạn thấy rằng hình như khối lượng có ảnh hưởng rất nhỏ.

Now comes something that I always find very, very nonintuitive and that is surface area.

Bây giờ đến một thứ mà tôi luôn luôn nhận thấy rất, rất không trực giác và đó là diện tích bề mặt.

I have two pieces of wood and they're identical—

Tôi có hai miếng gỗ và chúng hoàn toàn giống nhau - -

whatever that means, "identical"; you can never make them exactly the same in terms of roughness.

Cho dù nó giống nhau; bạn không bao giờ có thể làm cho chúng giống nhau chính xác và nhám.

This surface we prepared as well as we prepared this bottom surface.  
Chúng tôi làm cho bề mặt này giống như bề mặt phía dưới này.

But this bottom surface here is four times smaller in area than this surface area here, the flat part.

Nhưng đây bề mặt phía dưới này có diện tích nhỏ hơn 4 lần diện tích bề mặt này, phần phẳng.

I'm going to put the flat one here and I'm going to put the same object—

Tôi sẽ đặt cái phẳng này và tôi sẽ đặt vật giống nhau - -

but with its small area—

nhưng với diện tích bề mặt nhỏ

here.

ây

If indeed the friction coefficient is independent of surface area, then when I tilt them they should start to slide roughly at the same angle.

Nếu quả thí nghiệm ma sát không phụ thuộc vào diện tích bề mặt, thì khi tôi nghiêng chúng chúng sẽ bắt đầu trượt gần như cùng một lúc.

There we go.

Đây.

14 degrees... 16... 18... one goes and the other one follows.

14 .....16.....18.....cái này trượt trước và cái còn lại cứ theo.

It was in two-tenths of a degree.

Đó là 2/10 của 1 độ.

And the reason why there's always some difference—

Và lý do tại sao luôn luôn có sự khác nhau nào đó - -

of course, the plank is not exactly uniform.

Tất nhiên, tấm ván không tuyệt đối đồng nhất.

I have to be careful that I don't touch the critical surfaces.

Tôi phải cẩn thận không chạm vào những bề mặt tới hạn.

So you have seen difference in friction coefficients and you have seen there's almost no effect on surface area and there's no effect on the mass.

Vậy bạn thấy các hệ số ma sát khác nhau và bạn thấy nó không phụ thuộc vào diện tích bề mặt và không phụ thuộc vào khối lượng.

And that is both very nonintuitive.

Và đó là hai thứ rất không trực giác.

The width of the tires of your car does not matter.

Bề rộng của lốp xe của bạn không là gì cả.

And that... I ask you the question to explain--

Và rằng.....tôi hỏi bạn một câu hỏi gì đó thích

in your assignment number three—

trong bài tập 3 - -

why race cars have very wide tires.

Tại sao các xe đua có lốp xe rất rộng.

There must be a reason for that.

Có một lý gì cho điều đó.

I want you to think about that.

Tôi muốn bạn nghĩ về điều đó.

There is another way that one can measure the friction coefficient which is way more complicated and really, that's not the reason why I want you to see it.

Có một cách khác đo hệ số ma sát là cách rất phức tạp và thực sự, đó không phải là lý do tại sao tôi muốn bạn thấy nó.

The reason why I want you to go with me through these arguments is that you begin to see how subtle and how really difficult friction is.

Lý do tại sao tôi muốn bạn đi cùng tôi qua những tranh luận này là ma sát thực sự khó và tinh tế như thế nào.

I'm going to put an object now on an incline again, as we did before and instead of having it sit on

its own I'm going to attach to it a string.

Bây giờ tôi sẽ đi và tôi sẽ lấy một thanh nghiêng lên nĩa, khi chúng ta làm điều này trên dây chèn vì  
mình nó còn lúc này tôi sẽ gắn nó vào dây.

So here is that object and here is the string and a pulley and here a string.

Vì vậy đây là vật thể đó và đây là sợi dây và ròng rọc và đây là dây.

And here is an object mass  $m_2$ , and this object has mass  $m_1$  and the angle here...  $\alpha$ .

Và đây là vật thể khối lượng  $m_2$ , và vật này có khối lượng  $m_1$  và góc  $\alpha$ ..... $\alpha$ .

I'm looking for my green chalk.

Tôi sẽ tìm viên phấn màu xanh.

I want to use the same color convention.

Tôi muốn dùng quy tắc màu giống nhau.

Now let's look at all the forces that we can think of.

Bây giờ hãy nhìn tất cả các lực mà chúng ta có thể nghĩ ra.

Here is  $m_1$ .

Đây là  $m_1$ .

Let's decompose that in  $y$  and  $x$  direction.

Hãy phân tích nó theo hướng  $y$  và  $x$ .

And I will call this direction  $y$ , as I always do perpendicular to the surface.

Và tôi sẽ gọi hướng này là  $y$ , như tôi luôn luôn làm vuông góc với bề mặt.

So we call this  $y$  and I will call this direction now the positive  $x$  direction.  
Và ý chúng ta gọi cái này là  $y$  và tôi sẽ gọi hướng này là hướng  $x$  dương.  
You're free to choose it any way you want to.

But do choose nó theo bất cứ cách nào mà bạn muốn.

The force here is  $m_2 g$ ...

Đây lực là  $m_2 g$ .....

and now comes a major problem.  
Và bây giờ đến vấn đề lớn.

The biggest problem is that you do not know in advance whether this system will start to accelerate in this direction or whether it will start to accelerate in this direction or whether it will not accelerate at all—

Vấn đề lớn nhất mà bạn không biết là trong lúc chuyển hướng này sẽ bắt đầu gia tốc theo hướng này hay nó sẽ bắt đầu gia tốc theo hướng này hay nó sẽ không gia tốc gì cả - -

it's quite possible.

Điều đó hoàn toàn có thể xảy ra.

And all these three cases, as you will see have to be dealt with independently.

Và tất cả ba trường hợp này, như bạn sẽ thấy phải xét một cách hoàn toàn độc lập.

You cannot do it with one equation, as you will see.

Bạn không thể làm nó với một phương trình, như bạn sẽ thấy.

Let's first decompose this force as we did before, in the  $y$  direction.

Đầu tiên hãy phân tích lực này như chúng ta đã làm từ trước, theo hướng  $y$ .  
So this one equals  $m_1 g \cos \alpha$  and this one, the  $x$  component—

Và ý cái này bằng  $m_1 g \cos \alpha$  và cái này, thành phần  $x$  - -

which is in the minus  $x$  direction now—

bây giờ theo hướng trục  $x$  - -

equals  $m_1 g \sin \alpha$ .

Bằng  $m_1 g \sin \alpha$ .

Clearly, this one--

Rõ ràng, cái này - -

$m_1 g \cos \alpha$ —

$m_1 g \cos \alpha$  - -

we never have to worry about.

Chúng ta không bao giờ phải lo lắng về nó.

There is no acceleration in the  $y$  direction so this normal force  $N$  will kill this one and this is  $m_1 g \cos \alpha$ .

Không có gia tốc theo hướng  $y$  vì vậy phản lực  $N$  này sẽ triệt tiêu cái này và đây là  $m_1 g \cos \alpha$ .

So you never have to worry about the  $y$  direction; we know there's no acceleration.

Vì vậy bạn không bao giờ phải lo lắng về hướng  $y$ ; chúng ta biết không có gia tốc.

We only deal with forces in the  $x$  direction that are of interest.

Chúng ta chỉ quan tâm nhúng lực theo hướng x.

There is a tension in this string and now comes the problem: I do not know in what direction the frictional force is.

Có lực căng trên dây này và bây giờ vấn đề: tôi không biết lực ma sát đi theo hướng nào.  
If this object has the tendency to go uphill—

Nếu vật này có khuynh hướng lên dốc—

which I don't know yet—

cái mà tôi chưa biết - -

then the frictional force is in this direction because it opposes always the direction in which the object wants to go.

Thì lực ma sát theo hướng này vì nó luôn luôn ngược với hướng chuyển động của vật.

If, however, this object wants to go in this direction—

Tuy nhiên nếu vật thì muốn chuyển động theo hướng này - -

which I do not know—

cái mà tôi chưa biết - -

then the frictional force has to be put in this direction.

Thì lực ma sát phải đặt theo hướng này.

And I don't know that.

Và tôi không biết điều đó.

The only thing I do know is that the maximum value of the friction will be  $\mu$  static times  $N$ , which is what we had there.

Điều duy nhất mà tôi biết là giá trị cực đại của ma sát là hệ số nhân  $N$ , là những gì mà chúng ta đã có ở đây.

Remember, that's the maximum value that the friction can have times  $m_1 g \cos \alpha$ .

Hãy nhớ lại, đó là giá trị cực đại mà ma sát có thể có nhân  $m_1 g \cos \alpha$ .

That I know.

Cái mà tôi biết.

So now, if I want to deal with this I have to look at three complete different situations: acceleration in this direction in which the friction is pointing here; acceleration in this direction in which the friction is pointing there; or no acceleration at all.

Vì vậy bây giờ nếu tôi muốn xét cái này tôi phải xét 3 trường hợp hoàn toàn khác nhau: gia tốc theo hướng này trong đó ma sát sẽ hướng về đây; gia tốc theo hướng này trong đó ma sát sẽ hướng về đó; hoặc không gia tốc gì cả.

There is also, of course, the tension here...

Tất nhiên, căng có lẽ cũng vậy.....

and this tension is exactly the same as that tension.

Và lực căng này đúng bằng lực căng đó.

We discussed that last time.

Chúng ta đã thảo luận điều này lần trước.

I will not go over that because this is an ideal and, of course, an unphysical situation.

Tôi sẽ không ôn lại điều đó vì đây là trường hợp lý tưởng, và tất nhiên là phi thực tế.

The pulley has no mass the pulley is completely frictionless and the string has no mass—

Ròng rọc không có khối lượng ròng rọc hoàn toàn không ma sát và dây không có khối lượng

--

it's a massless string.

Nó là một dây không có khối lượng.

And I argued last time that therefore the tension here must be the same as the tension there.

Và lần trước tôi đã biện luận rằng do đó lực căng ở đây phải giống như lực căng ở đó.

We even know the tension.

Thậm chí chúng ta biết lực căng.

I'm going to evaluate, for now only situations that the system is at rest.

Bây giờ, tôi sẽ tính toán cho trường hợp hệ thống đứng yên.

It's not yet moving.

Nó chưa chuyển động.

If the system is at rest,  $T$  must be  $m_2 g$  because this object is not being accelerated.

Nếu hệ đang yên, T phải bằng  $m_2g$  vì vật này không có gia tốc.

So we already know that all situations where the system is at rest T must be  $m_2g$ —

Vì vậy chúng ta đã biết rằng trong mọi tình huống khi hệ đang yên thì T phải bằng  $m_2g$  — that's nonnegotiable.

Điều hiển nhiên.

It's this T as well as that T.  
Nó là T này cũng như T đó.

Now I have to start splitting in the following situation.  
Bây giờ tôi phải bắt đầu tách trường hợp sau.  
My first option is that I make the assumption that the system is just...

Tùy chọn ban đầu của tôi là tôi gần như  
just about to start accelerating upwards.

Sắp bắt đầu gia tốc lên trên.

It isn't doing it yet; it is just about to do that.  
Nó chưa làm điều đó; nó sắp bắt đầu làm điều đó.

If that's the case, then I know that the frictional force will be in this direction and it will have reached the maximum value with the static friction coefficient.

Nếu là như vậy thì tôi biết rằng lực ma sát sẽ theo hướng này và nó sẽ đạt giá trị cực đại với hệ số ma sát tĩnh.

Now I can write down, in the x direction, Newton's Second Law.  
Bây giờ tôi có thể viết ra định luật II Newton theo hướng x.

Now I have T, which is in the positive direction minus  $m_1g \sin \alpha$  minus  $F_f \max$ .  
Bây giờ tôi có T, hướng theo chiều dương trừ  $m_1g \sin \alpha$  trừ  $F_f \max$ .

That now has to be zero, just at the moment that it is just about to change its mind and start accelerating.

Bây giờ cái đó phải bằng 0, ngay tại lúc mà nó bắt đầu thay đổi ý nghĩa nó và bắt đầu gia tốc.  
Now, I know what T is, that is,  $m_2 g$  so  $m_2 g$  equals  $m_1 g \sin \alpha$  plus the maximum frictional force, which is this value.

Bây giờ tôi biết rằng T bằng, nó là  $m_2 g$  vì vậy  $m_2 g$  bằng  $m_1 g \sin \alpha$  cộng lực ma sát cực đại, bằng giá trị này.

So this is just at the moment that it wants to start sliding.

Vậy đây đúng là lúc nó bắt đầu muốn trượt.

Therefore, if I make mass  $m_2$  a hair larger, just a hair it will go.

Do đó, nếu tôi tăng khối lượng  $m_2$  lên một tí, chỉ một tí thôi nó sẽ

bắt đầu chuyển động.

And therefore the moment that I make this a larger sign I know that it's going to accelerate uphill.

Và do đó lúc mà tôi tăng cho cái này một chút thì hiểu nhầm tôi biết rằng nó sẽ gia tốc lên dốc.

That's the criterion for going uphill.

Đó là dấu hiệu lên dốc.

Now I look at situation two.

Bây giờ xét trường hợp 2.

Now I make the assumption that the object, still standing still is just about to start accelerating downhill.

Bây giờ tôi giả sử rằng vật, vẫn còn đứng yên sẽ bắt đầu gia tốc theo hướng xuống dốc.

Aha! If that's the case, I know that the maximum force is now pointing upwards—

Aha! Trong trường hợp này, tôi biết rằng lực cực đại đang hướng lên trên --

the same magnitude, but it has now a different direction.

Cùng lớn, nhưng bây giờ có hướng khác.

So now I can write down Newton's Second Law.

Vì vậy bây giờ tôi có thể viết ra định luật II Newton.

So the frictional force is now helping T.

Vì vậy bây giờ lực ma sát sẽ hỗ trợ T.

So now we get T plus  $F_f \max$  minus  $m_1 g \sin \alpha$  equals zero.

Vì vậy bây giờ chúng ta có  $T$  cộng  $F_f \max$  trừ  $m_1 g \sin \alpha = 0$ .

We know that this is  $m_2 g$  so  $m_2 g$  equals  $m_1 g \sin \alpha$  minus  $F_f \max$ .

Chúng ta biết rằng đây là  $m_2 g$  vì vậy  $m_2 g$  bằng  $m_1 g \sin \alpha$  trừ  $F_f \max$ .

Notice the difference: there's a plus sign here; there's a minus sign here.

Chú ý những khác nhau: đây có một dấu cộng; đây có một dấu trừ.

This is... the object is still not moving but if I make  $m_2 g$  a hair less, just a teeny-weeny little less it  
ây là v t v n còn ch a chuy n ng nh ng n u tôi làm  $m_2 g$  nh h n m t ít, ch nh h n m t ít  
will definitely start to accelerate downwards.

D t khoát s b t u gia t c xu ng phía d i.

So if I make this "smaller than" sign the object will start accelerating downhill.

Vì v y n u tôi kí hi u cái này b ng d u nh h n v t s b t u gia t c xu ng d c.

This is condition one, this is condition two.

ây là i u ki n 1, ây là i u ki n 2.

If the condition is neither one nor two...

N u c 1 và 2 u không thỏa mãn

what do you think will happen then? Very possible that you don't meet any one of these two conditions.

B n ngh i u gì s x y ra? R t có th b n s không g p b t c cái nào trong hai i u ki n này.

What do you think will happen?

B n ngh i u gì s x y ra?

[class murmurs]

LEWIN: Can't hear you.

Không nghe c.

[student replies]

LEWIN: It won't move—

Lewin: nó không chuy n ng --

a is zero.

a b ng 0.

Because this... both cases are going to accelerate so in all other cases, the acceleration equals zero.

Bởi vì cái này... cả hai trường hợp sẽ gia tốc vì vậy trong tất cả các trường hợp khác, gia tốc bằng 0.

And the frictional force, in this case will adjust itself just the right way so that Newton's Second Law in the x direction will give you, for the force, a zero.

Và lực ma sát, trong trường hợp này sẽ điều chỉnh sao cho theo định luật II Newton về lực theo hướng x sẽ cho bằng 0.

Let us take a very simple example so that you see this at work.

Hãy lấy ví dụ rất đơn giản để bạn thấy điều này đúng.

So, we have an example here, and in my example I have  $m_1$  equals 1 kilogram,  $m_2$  equals 2 kilograms.

Vì vậy chúng ta có một ví dụ này, và trong ví dụ của tôi tôi có  $m_1$  bằng 1 kg,  $m_2$  bằng 2 kg.

Can't make the numbers much simpler.

Không thể làm cho những số này đơn giản hơn nữa.

I take alpha equals 30 degrees.

Tôi lấy alpha bằng 30 độ.

I take a static friction coefficient which is 0.5 and I take a kinetic friction coefficient which is a little less, which is 0.4.

Tôi chọn hệ số ma sát tĩnh bằng 0.5 và tôi chọn hệ số ma sát động hơi nhỏ hơn một chút, bằng 0.4.

The question is now, is it going to be accelerated uphill or accelerated downhill or no acceleration at all? What it comes down to is that we have to evaluate these three terms.

Bây giờ, câu hỏi là: nó sẽ gia tốc lên dốc hay xuống dốc hay không gia

tốc gì cả? Bởi vì câu trả lời là gì chúng ta phải tính toán ba số hạng này.

Let's first take  $m_2 g$ —

đầu tiên hãy tính  $m_2 g$  --

$m_2 g$  equals 20.

$m_2 g$  bằng 20.

We'll just take, for  $g$ , 10—

Chúng ta sẽ lấy  $g$  bằng 10 --

that is just easier.

điều này đơn giản hơn.

$M_1 g \sin \alpha$ ...

$M_1 g \sin \alpha$ .....

The sine of alpha is a half, so that is five.

$M_1 g \sin \alpha$  equals five.

And what is  $F_f$  maximum? I have to use, for my friction coefficient, .5.

I have to use, for  $m_1$ , one here, a 10, and have the cosine for 30 degrees.

And what I find--

you have to take my word for it--

that this is about 4.33, and I want to remind you I have used the static friction coefficient.

This is in newtons.

I never put a capital N for newtons because that is very confusing with this normal force.

All my units are always in S.I. units so the force is always in newtons.

Aha! We are well on our way.

Let's first test whether condition one is met.

Is 20 larger than 5 plus 4.33? And the answer is yes, it is.

So we know that it's going to be accelerated uphill.

That is nonnegotiable.

So now I could ask you a simple question: What is the acceleration and what is the tension in the string? And so you will think "Oh, well, that is within arm's reach." Not quite, because things are now going to change.

If it is going to be accelerated uphill then at least I know one thing which I am going to put in this drawing now.

I know that this is the maximum friction possible which now becomes  $\mu$  kinetic--

because it's going to move--

times  $m_1$  times  $g$  times cosine  $\alpha$ .

So that is already one change.

It is moving, so sure, it's going to be accelerated so the frictional force is in this direction, has this value.

So let's write down now Newton's Second Law in the  $x$  direction.

So we have  $T$  in the positive direction minus  $m_1 g \sin \alpha$  minus this maximum force--

minus  $\mu_k m_1 g \cos \alpha$ --

and that, now, according to Newton's Law, must be  $m_1 a$ , if  $a$  is  $T$  acceleration uphill.

One equation with two unknowns.

You don't know  $a$  and you don't know  $T$ .

Or do you know  $T$ ? What is  $T$ ? What is the tension? What is the tension when that thing is being accelerated uphill? Anyone has the courage to try?

[student responds]

LEWIN: You think " $m_2 g$ "--

you couldn't be more wrong.

It's now moving, it's being accelerated.

That means this object is going to be accelerated down and if this force is the same as this it can never accelerate down.

This  $T$  must get smaller.

Remember, an object in an elevator being accelerated down loses weight--

it's losing weight.

This object must be accelerated down.

We have to take that into account.

So the tension, once it starts accelerating, will go down.

So I have the second equation for object number two.

I call this the plus direction, so for object number two I have  $m_2 g$  minus  $T$  equals  $m_2$  times  $a$ .

It is very important that you see that the tension will change.

Now I have two equations with two unknowns and now I can solve.

It's very easy--

you just add them, and I leave you with that.

I'll just give you the results.

I find that the acceleration,  $a$ , equals plus... I think 3.85.

That is correct--

plus 3.85 meters per second squared.

And I find that the tension equals 12.3 newtons.

I want to dwell on this a little bit.

I find, for the acceleration, a plus sign.

Had I found a minus sign, I would...

I'm sure I would have made a mistake.

Why is it mandatory that I find a plus sign? Absolutely mandatory! Who wants to try that one?  
Yeah?

[student making explanation]

LEWIN: Yeah, you say...

you say it well.

I would have said it slightly differently.

We know that the acceleration is in this direction.

We derived that.

Therefore the acceleration since I call that the "plus x direction"--

that was my plus sign--

must come out plus.

So if this comes out negative, you've made a mistake.

I also want this number to be less than 20.

If not, I've made a mistake.

Why does that number have to be less than 20?

[student making explanation]

LEWIN: Exactly--

this object is going down. To put it the way we put it last time it lost weight, it's accelerated downwards.

This  $N_T$  g, which is 20, better wins it from T; otherwise it would never be accelerated down.

So this plus sign is a must, and this is a must.

And if you find not a plus sign but a minus sign you have to go back to your calculation because you've made a mistake.

Now we take the same situation, I leave everything unchanged but I make the second mass,  $m_2$ , I make it 0.4 kilograms.

So now all the numbers remain the same that we have there except that  $m_2$  g now becomes 4.

Now I'm going to test again.

This  $m_2$  g, which is 4--

is that larger than 5 plus the frictional force static, 4.33? The answer is no.

I'm going to test for my second case.

Is  $m_2$  g smaller than 5 minus 4.33? The answer is no, so what do we conclude? What must be our conclusion? Condition one is not met, condition two is not met.

The conclusion is a is zero.

The object will not be accelerated and the frictional force is going to adjust along the x direction so that the acceleration indeed is zero.

How does the frictional force do that? This is that slope, here is that object.

I will only put in the forces along the x direction.

I don't bother about the y direction.

I know that there is  $m_1$  g sine alpha, and that one is 5.

So we have here a component of gravity which is the  $m_1$  g sine alpha, and we know that that is 5.

We have it there.

I also know that we have tension here and the tension must be  $m_2 g$  because the object is not being accelerated.

We're back where we were.

Number two is not being accelerated.

The tension is 20...

sorry, not 20, what is my  $m_2$ ? The tension is...  $m_2 g$  is 4.

Five newtons downhill, four newtons uphill.

What will the friction be, how large, and in what direction? Uphill, how large? One, exactly.

The friction will adjust itself so that there is equilibrium if nothing is going.

All right, I now would like to do a few demonstrations whereby I want you to calculate the friction coefficients for me.

So we're going to put a particular object on that incline and I'm first going to raise the angle until it breaks loose.

So you should be able to calculate what the friction coefficient is using the equation  $\tan \alpha = \mu_s$ .

And the object that I use for that is this... this box.

In this box is a little weight that's not very important.

It makes the whole thing 361 grams.

I want you to know that the weight of this object is 361 grams.

I'll write it down for you here.

So, the mass of the object is 361; I'm sure that the uncertainty is at least 1 gram.

You have to trust me when I give you the angles.

I'm going to increase the incline and there comes a moment that it will start to slide.

I'll give you the angle and I want you to calculate that friction coefficient.

So we'll do that first...

there we go.

It's now 10 degrees, 11...

12 , 13... 14, 15... 16 17... 17 , 18, 19, 19 , 20--

20 degrees.

It starts to slide at about 20 degrees--

write that down.

Now I'm going to do exactly this experiment: Put a rope over it, with a pulley, and put  $m_2$  on this side.

And now I'm going to load down  $m_2$  to the point that it starts to slide uphill.

That should allow you to also calculate the friction coefficient.

You have all the tools for it, because once you know that it is just at the point of breaking and going uphill you know that that equals sign of that equation holds and so you should be able to calculate the friction coefficient.

Would you find exactly the same number as you find from this experiment? Not very likely.

You have to think about that for yourself.

Wood has grain, and the grain in this direction could be very different from the grain in this direction.

But it would be interesting to compare the two numbers to see how much they're off.

So I'm going to put here this rope over here and I'm going to set the angle now at a given value so this is now not negotiable.

I set it at 20.

I could be off by half a degree.

Again, you see, it wants to go.

You just saw that--

at 20 degrees, it wants to go.

So I prevent it from going and so I'm going to put a little weight on here.

**Now there is 100 grams, and it's not going.**

Bây giờ nó có 100 g, và nó không chuyển động.

It's happy and it's sitting there.

Nó hạnh phúc và nó đang yên ổn.

A is zero.

A bằng 0.

That condition isn't met and this condition isn't met.

Điều kiện này không thỏa mãn và điều kiện này không thỏa mãn.

So now you must write down in your notebook that alpha now—

Vì vậy bây giờ bạn phải viết ra trong vở của bạn góc alpha nó --

it's an independent experiment—

Nó là một thí nghiệm độc lập --

equals 20.0, maybe plus or minus 1.

Bảng 20.0, có lẽ là chính xác 1.

I think it's about 1 degree accuracy that I can do.

Tôi nghĩ tôi có thể chính xác 1 độ.

Okay, I'm going to load here more weight—

Vâng, tôi sẽ thêm tải trọng lên đây --

more mass, I should say--

nghĩa là, khối lượng --

at  $m_2$  and I'll give you the numbers and when it breaks loose, you will see it.

Vào  $m_2$  và tôi sẽ cho bạn số và khi nó bắt đầu chuyển động, bạn sẽ thấy nó.

I will give you the numbers.

Tôi sẽ cho bạn số

Now, I have done this many times, believe me and the breaking point is not always at the same mass.

À, tôi đã thực hiện thí nghiệm này nhiều lần, hãy tin tôi và điểm mà nó không trượt cùng một khối lượng.

The mass could differ by 20, 25 grams easily.

Khối lượng có thể khác nhau 20, 25 g.

So whatever number we're going to find for  $m_2$  I would say you should at least allow an uncertainty of about something like 25 grams just because I've done it many times...

Vì vậy cho dù chúng ta tìm ra  $m_2$  bằng bao nhiêu tôi khuyên bạn ít nhất nên cho phép sai số khoảng 25 g chớ vì tôi đã làm thí nghiệm đó nhiều lần....

and I know it could even be worse at times.

Và tôi biết thậm chí đôi khi nó có thể tệ hơn.

The humidity could change in the room and that could change the friction coefficient.

Độ ẩm có thể thay đổi trong phòng và điều đó có thể thay đổi hệ số ma sát.

Okay, we have 100 grams on it...

Vâng, bạn có 100 g trên nó....

we have 200 grams on it...

chúng ta có 200 g trên nó....

250... 260... 270, and it goes at 270.

250....260...270, và nó chuyển động tại 270.

Did you see it go? It started to slide at 270.

Bạn có thấy nó chuyển động không? Nó bắt đầu trượt tại 270.

So at 270 grams, I met exactly that condition.

Vì vậy tại 270g, điều kiện đó chính xác

It was an equals sign.

Nó là dấu bằng.

That should allow you to calculate the static friction coefficient and you'll get a chance to do that in your third assignment.

Điều đó cho phép bạn tính toán hệ số ma sát tĩnh và bạn sẽ có cơ hội làm điều đó trong bài tập lần 3.

When I had this thing up here, and when I was loading this down making it heavier and heavier, I hope you realize that at first it wanted to slide in this direction.

Khi tôi đặt vật này lên đây, và khi tôi thêm tải trọng làm cho nó nặng hơn và nặng hơn, tôi hi

vọng rằng đầu tiên nó muốn trượt theo hướng này.

So at first the friction was in this direction.

Vì vậy ưu tiên lực ma sát theo hướng này.

As I loaded it down more and more the friction became less and less and less.

Khi tôi tải thêm tải trọng lên nó lực ma sát trở nên nhỏ và nhỏ và nhỏ hơn.

There comes even a time that the friction becomes zero.

Thậm chí có thể mất lúc mà lực ma sát bằng 0.

I loaded more and more and more.

Tôi tải thêm tải trọng nữa và nữa và nữa.

The friction flips over to the other side.

Lực ma sát đổi chiều sang phía khác.

The friction grows and grows and grows fights an heroic battle to not make it go uphill loses the battle at one point, reaches the maximum value.

Lực ma sát tăng và tăng và tăng chống lại mọi cố gắng không làm cho nó lên dốc thua trận tạm thời, đạt giá trị cực đại.

I put a little bit more on here and it goes.

Tôi tải thêm một ít tải trọng lên đây và nó bắt đầu chuyển hướng.

So this frictional force is really having a rough time starting off in this direction, slowly becoming less becoming zero, changing direction, reaching the maximum and finally losing the battle.

Vì vậy lực ma sát thực sự có một thời gian bị nài nỉ ngược xu hướng này, chậm rãi mất đi không, đổi hướng, đạt giá trị cực đại và cuối cùng thua trận.

Friction is often a pain in the neck, as we all know.

Ma sát thường gây ra sự phiền toái, như tất cả chúng ta đều biết.

Friction causes wear, it causes tear and it costs fuel.

Ma sát gây ra sự mài mòn, và tốn nhiên liệu.

With a car, there's a lot of friction with the road.

Với xe hơi, có nhiều ma sát với mặt đường.

You pay for that, and people try to reduce friction with bearings and with lubrication, oil.  
B n ph i t n kém cho i u ó, và ng i ta c gi m ma sát b ng b c n và v i ch t bôi tr n, d u.

Water is an amazing lubricant.  
N c là m t ch t bôi tr n áng kinh ng c.

If it starts raining and there is a little bit of dust on the road the friction coefficient between your tires and road can become so low that you begin to hydroplane and that you literally...

N u tr i b t u m a va trên ng h n b n thì h s ma sát gi a l p xe c a b n và ng vcos th tr nên quá th p n n i b n b t u tr t trên n c và b n úng là.....

[makes whooshing sound]

that your friction coefficient goes almost to zero.

H s ma sát c a b ng n nh ti n t i không.

It happened to me once, and it's no fun.

i u ó ã x y ra v i tôi m t l n, và nó không vui.

It can happen instantaneously particularly when the rain begins--

i u ó c ng x y ra ngay t c thì c bi t khi c n m a b t u - -

in the very early part of the rain when the road is dusty so you get the water with a little bit of dust mixed.

Lúc m i b t u m a khi ng b n vì v y ng có n c l n v i m t ít b i.

It's a very dangerous situation.

i u ó r t nguy hi m.

At home, I have a pan—

nhà, tôi có m t cái ch o - -

this is my pan at home.

ây là cái ch o nhà tôi.

Actually I have more than one pan at home, believe me.

Th c s tôi có vài cái ch o n a nhà, hãy tin tôi.

But this is a very special pan and what is special about it is something that I discovered purely by accident and I want to share with you this remarkable pan.

Nh ng ây là cái ch o c bi t và i u c bi t v nó mà tôi ã tình c khám phá c và tôi mu n chia s v i b n v cái ch o áng chú ý này.

You see, when I rotate this cover there's a lot of friction—

B n th y ch a, khi tôi quay n p có nhi u ma sát - -

you can hear it.

B n có th nghe nó.

[metal lid grating]

And it stops.

Và nó d ng.

You can hear it, right? And so one evening I was boiling potatoes and I was looking at this pan, and I walked up to it because I wanted to check the potatoes.

Bạn có thể nghe nó, phải không? Và vì vậy một buổi tối tôi đang luộc khoai tây và tôi đang nhìn vào cái chảo, và tôi tiến gần nó bởi vì tôi muốn kiểm tra khoai tây.

And I touched the thing, and there was no friction.  
Và tôi chạm vào mặt chảo, và không có ma sát.

It just went spinning and spinning and spinning.  
Nó chỉ quay và quay và quay.

I couldn't believe my eyes until I realized what is happening.  
Tôi không tin vào mắt mình cho đến khi tôi nhận ra điều gì đang xảy ra.

Water had accumulated in the rim of this pan and the cover was beginning to hydroplane.

[metal lid skimming freely]

I'm putting water in it now.

[metal lid skimming freely, silently]

You almost don't hear it anymore.

Isn't that amazing? Almost frictionless.

So now the water acts like a lubricant.

And you try it with your pan, it won't work because you need just the right shape and you need the right edge to be able to lubricate it that way.

There are many experiments that are done and many attempts have been made by people to reduce friction.

You try, if you can, to avoid contact between two surfaces.

That you can do by putting a lubricant in between.

But even better it would be if you could separate the object completely and only have air in between because air has much less friction than a liquid.

And that's being done with great success.

People use hovercrafts so they blow air out from below so the craft lifts itself up and now it's no longer in contact with the water.

It's above the water, so if it moves now all it has to overcome is the air friction and that's it and that helps tremendously.

You will be seeing in this lecture hall many demonstrations that I will be doing in the future with what I call an "air track." I will show it to you in a minute.

It is a long...

call it a bar, for now.

The cross-section is a triangular shape and there are holes in here, and we blow air out of that.

And on top of that are devices which have been specially designed to perfectly fit this triangle.

And when you start blowing the air they are lifted up, so they float.

And so now when you give them a little tap they can move almost--

not quite, but almost--

without friction.

Here's one... a lot of friction.

Now I'll turn on the air.

[air whooshing]

Look at the difference.

Isn't that amazing? It's floating on its own air cushion.

And if I turn it off...

[air clicks off]

the moment that the air stops, you will see it stops.

So this is the technique that is often used to do demonstrations if you have to do them with a minimum of friction.

Of course, you could do experiments in the shuttle very well, where you have, again, only air around you.

But that's, of course, a very expensive way.

In 26.100, we will use the air track when we start colliding objects and try to see what happens before and after the collision.

There is another device, which is very intriguing and that also acts on the idea that it lifts itself up as a result of gas which is flowing out.

In this case, it's a container of carbon dioxide...

with carbon dioxide in here, which is solid and there is a small opening here and this is an extremely well machined flat surface, very flat.

And the whole thing rests on an extremely flat surface.

Because of the room temperature the carbon dioxide will start to evaporate and will start to flow out.

And therefore under this thing comes a film a very thin layer of carbon dioxide and now you can move this around in two dimensions.

You are not stuck, like you are there, to one dimension of going back and forth on what we call the air track.

But now you can move it around over this whole surface.

And that allows you to do very interesting things as I want to show you next.

First make it dark.

FILM NARRATOR: And we've filled that can with dry ice that is, solid carbon dioxide.

Now, you know solid carbon dioxide is very cold.

This white stuff is just frost that's gathered on the outside of the can.

Now, as the can absorbs heat from the room the carbon dioxide evaporates and turns into a gas.

The gas takes up more room than the solid so it has to go somewhere.

It can't come out the top so it comes out a little hole here in the bottom of the disc.

Now, you can't see it coming out the hole, but if I make a flame I think you can see that there's gas coming out and blowing the flame.

Now if we put the disc--

with its stream of gas coming out the bottom--

down on our table top which is made of a very smooth piece of plate glass...

We can wait a moment while the gas coming out builds up pressure underneath which it has to do in order to escape.

By now, the disc is floating on this film of escaping gas.

That film is so thin that I'm sure you can't see it from out there.

I can scarcely see a space between the disc and the glass, myself.

But if you'll come and look over my shoulder I think I can show you that there is a space by slipping underneath the disc this piece of tinfoil I took off a chewing gum wrapper.

Now, we'll slip the tinfoil between the disc and the plate glass top of the table showing that there is indeed a space, a thin film of gas between the disc and the glass upon which it's resting.

The purpose of this is simply to reduce the friction to a point where we won't have to worry about it or measure it in our experiments today.

It's fun to play with this thing--

let me show you.

I'll give it a little push, just a little one.

And there it goes, moving sedately, no sign of slowing up.

Come on back.

Same thing in the other direction.

It takes only a very tiny force to start it in motion.

Let me show you that.

[triumphant Spanish; dance music playing]

[music continues throughout rest of film]

LEWIN: So you see, fleas are good for something.

Have a good weekend.

See you Monday.