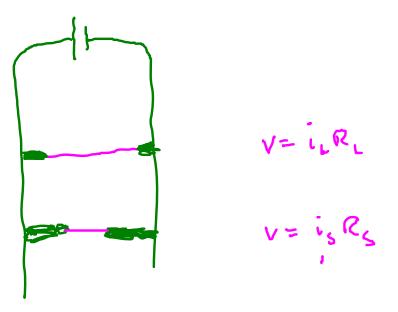
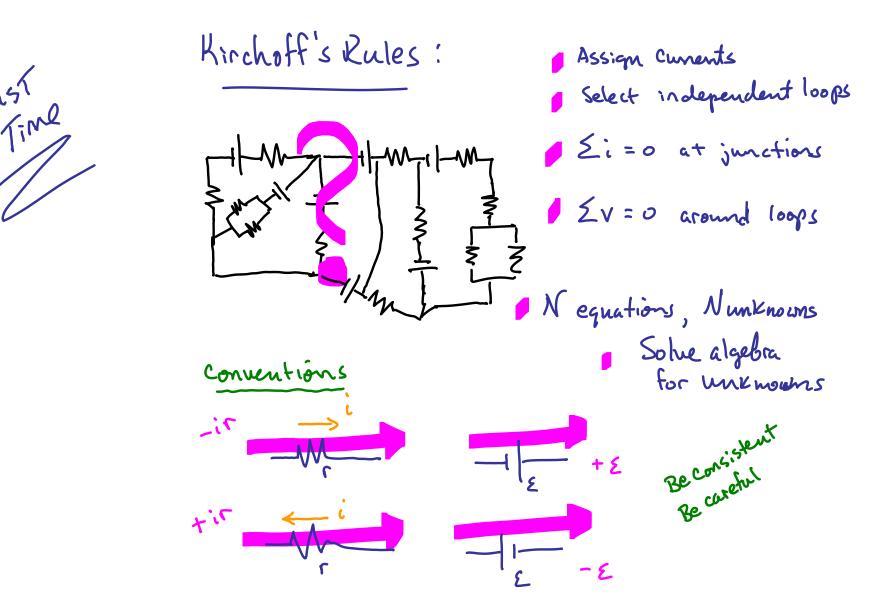
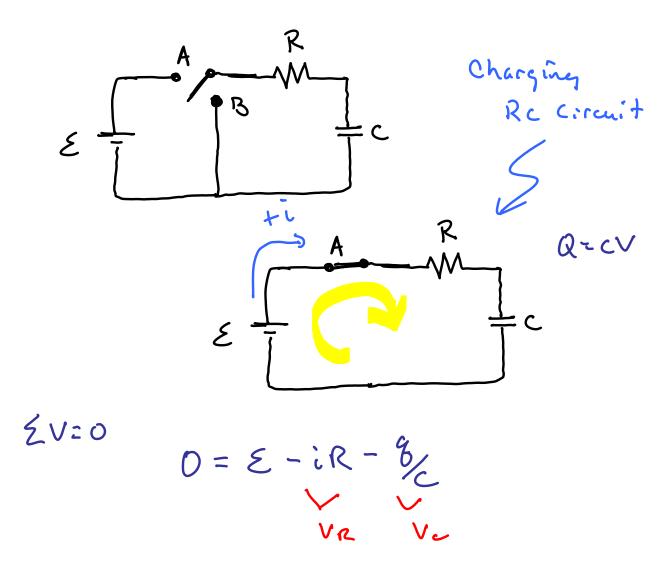
Physics 142 - October 16, 2014 Exam grading Not yet done ... hopefully Next Tuesday Apologies Project questions No addition Hand in project Irst is or ordered 1-5 list of Tapics of Interest by Next Theoday...

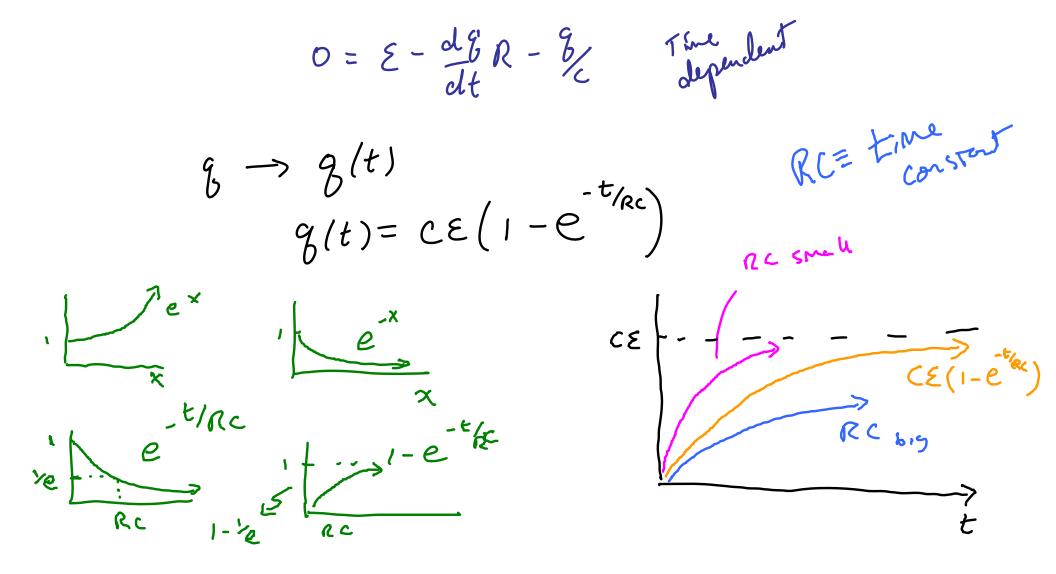


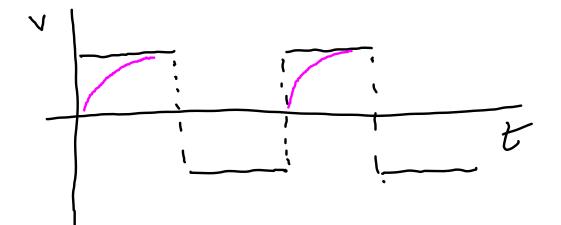




1\_051



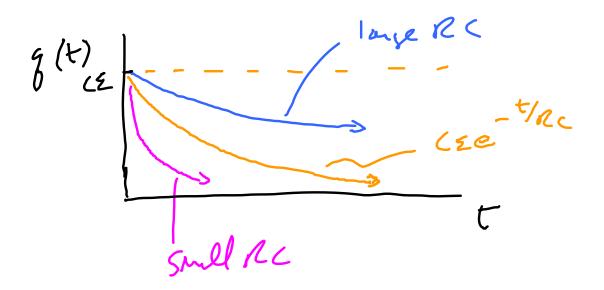




 $\mathcal{L}$ 

 $\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} \sum_{i$  $-\int_{a}^{b} \frac{dg}{dg} = \frac{1}{Rc} \int_{a}^{b} \frac{dt}{dt}$   $-\int_{a}^{b} \frac{dg}{dg} = \frac{1}{Rc} \int_{a}^{b} \frac{dt}{dt}$   $-\ln \frac{3}{2} = \frac{t}{Rc}$ 

g = goe - t/Rc



#### **Relativity: the warping of space, time, and minds**

DES AND OTHER DESIGN AND, 14TH

ANNALEN

PHYSIK.

supplication and manufacture arrange F. L. G. SHEL, L. W. GLERRT, J. C. PHENTHEREF, L. CHO E. WITHERLAX.

VIERTE FOLGE.

BAND 17.





3. Zur Kloberodynamik bewegter Körper; ven A. Tinstein.

Daš die Elektrodynamik Maxwella -- wie deselbe gegennirtig sufgefaßt zu worden pflegt - in ihrer Azwendung saf swegte Körper zu Asymmetrion faurt, welche den Phinamenen icht azzahaften scheinen, ist bekonnt. Man denke z.B. an e elektrodynamische Wochselwirkung swieeben einem Magtien and einem Leiter. Das beobachtbare Phanemen hlingt hier vor ab van der Reintivbewegung von Leiter und Nagnet,

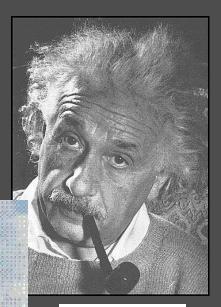
allerend noch der ablieben Auffassung die beides Falle, das de mine oder der andere dierer Körper der bewegte sei, streng mander zu trennen sind. Dowegt sich nämlteh der Magnet

und raht der Leiter, so entsteht in der Uesgebung des Magneten vin aliktrisches Feld ven gewissern Esergievone, wrlebes an

des futen, wo sich Teile der Leiters befinden, einen Strom

eren & Ruht aber der Magnet und benegt sich der Leiten

**Steve Manly Department of Physics and Astronomy University of Rochester** 





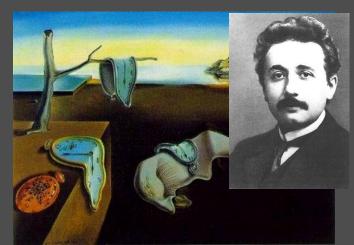
Closed Geometry

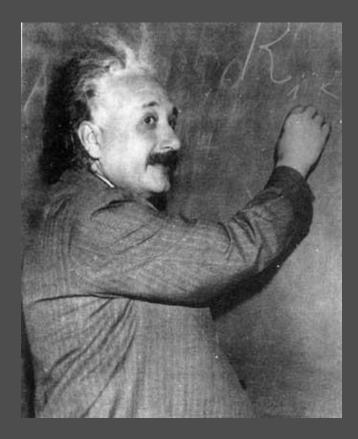


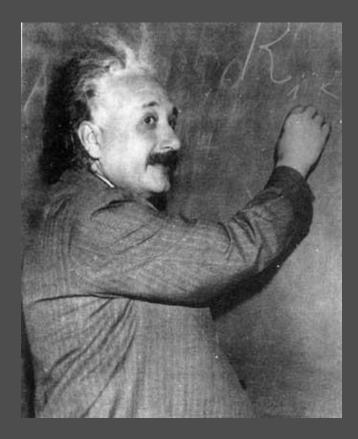


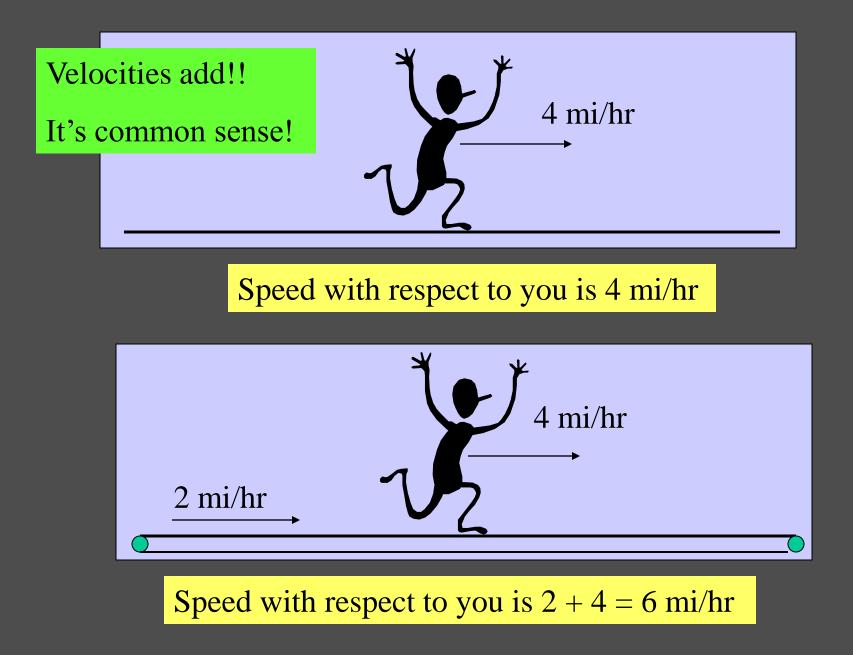


Flat Geometry

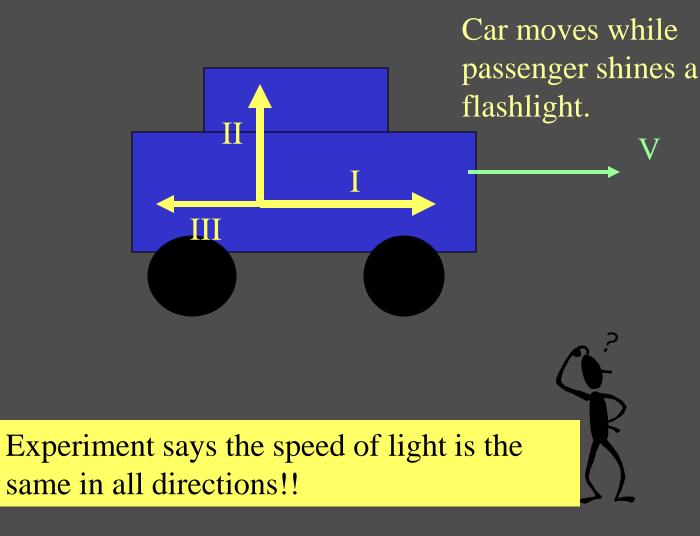






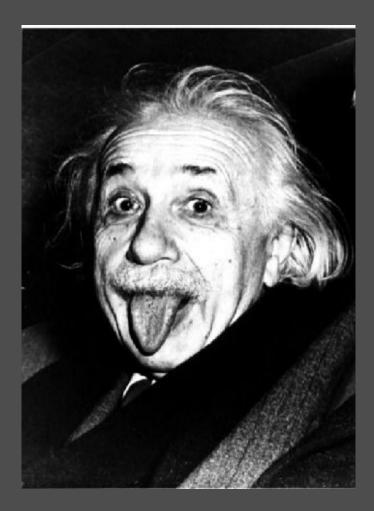


The speed of light is greater for beam I, beam II or beam III?



#### Weird, huh? What does it mean for the real world?

#### **Enter our man Einstein!**



#### Einstein's 2 postulates:

# The velocity of light is the same for observers in all inertial reference frames.

The "physics" is the same for all observers (even if in different inertial reference frames).

ANNALEN PHYSIK. Arts PERSONAL PRAME K. L. C. SHEN, L. K. SERSIT, J. C. PRESERVATIF, K. 1990 K. WINDOWSKY, VIERTE FOLGE. BAND 17. the owner have do and

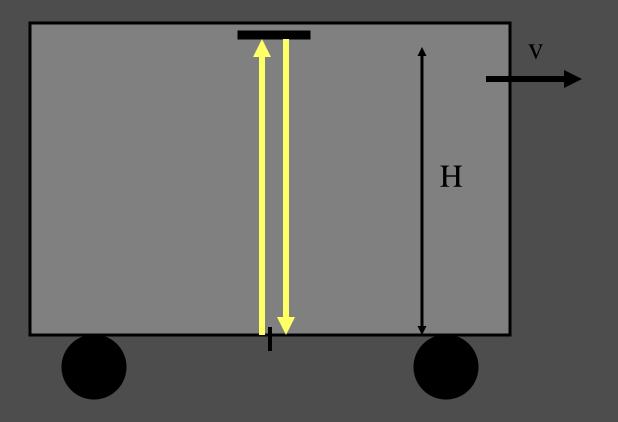
3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; ven A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie deselbe gegannietig aufgefaßt zu worden pflagt — in ihrer Anwendung auf wegte Eleper zu Asymmetrion fahrt, welche den Pflansmenen uch atzeihaften scheinen, ist belonzt. Man denke z B an en und einem Leiter. Das brobachthare Philosmen blagd hier our ab van der Reintribevegung von Leiter und Nagest al trend noch der oblichen Auflaszung die beiden Falle, daß einen echer das asdesse diesen Rürger der bewegte sei, streng immerken zuferter, so entitcht in der Usegebung des Magneten ucht beiter, so entitcht in der Usegebung des Magneten uht der Leiter, so entitcht in der Usegebung des Magneten uht der Leiter, so entitcht in der Usegebung des Magneten uht der Leiter, so entitcht in der Usegebung des Magneten uht der Leiter, so entitcht in der Usegebung des Magneten uht der Leiter, so entitcht in der Usegebung des Magneten uht der Leiter, so entitcht in der Usegebung des Magneten uht der Leiter, so einte der Leiters befinden, einen Strenn viesa, wo sich Tadle der Leiters befinden, diese Streng und in heiter der Magnet und bewegt sich der Leiter

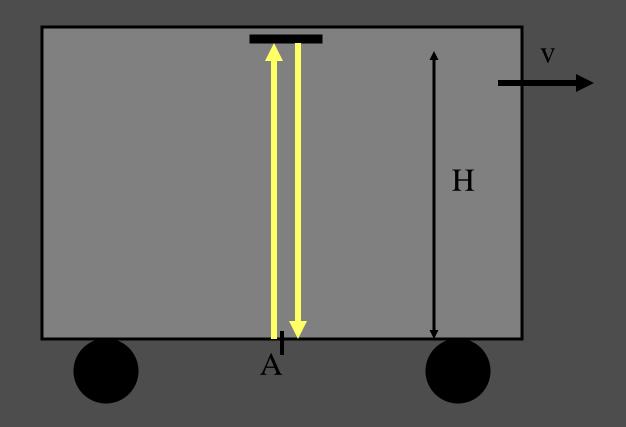


Einstein thought experiment:

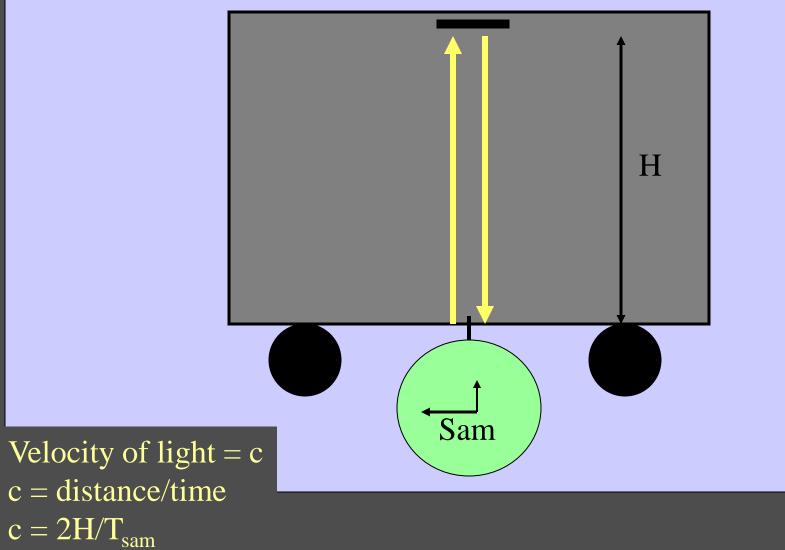
Consider a beam of light that is emitted from the floor of a train that bounces off a mirror on the ceiling and returns to the point on the floor where it was emitted.



Fact: Light is emitted and detected at point A. This fact must be true no matter who makes the measurement!!!!

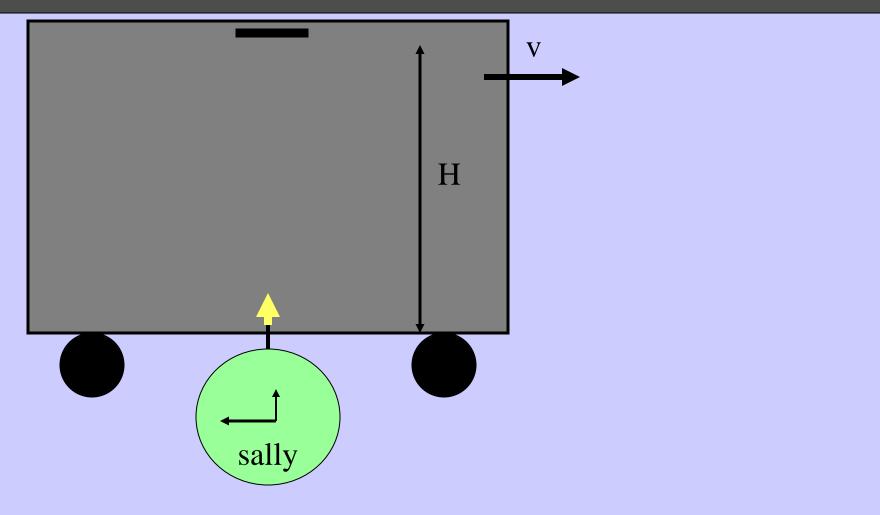


#### Sam is on the train

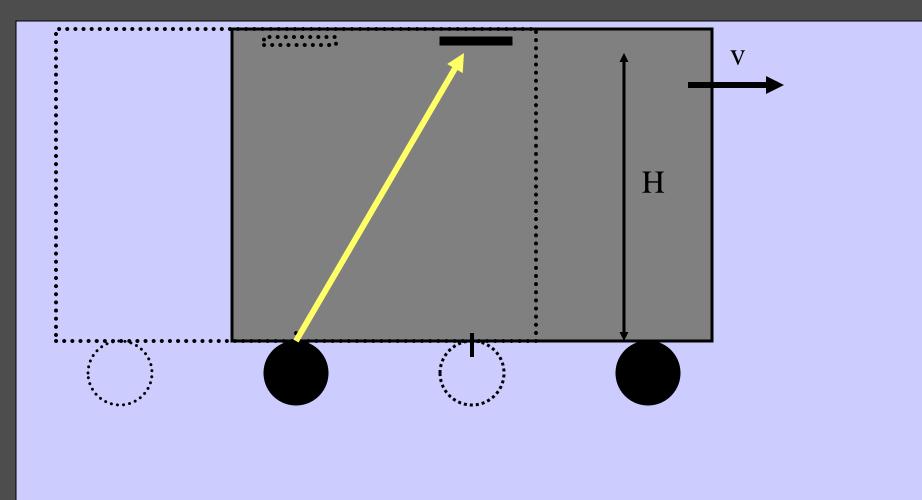


 $T_{sam} = 2H/c$ 

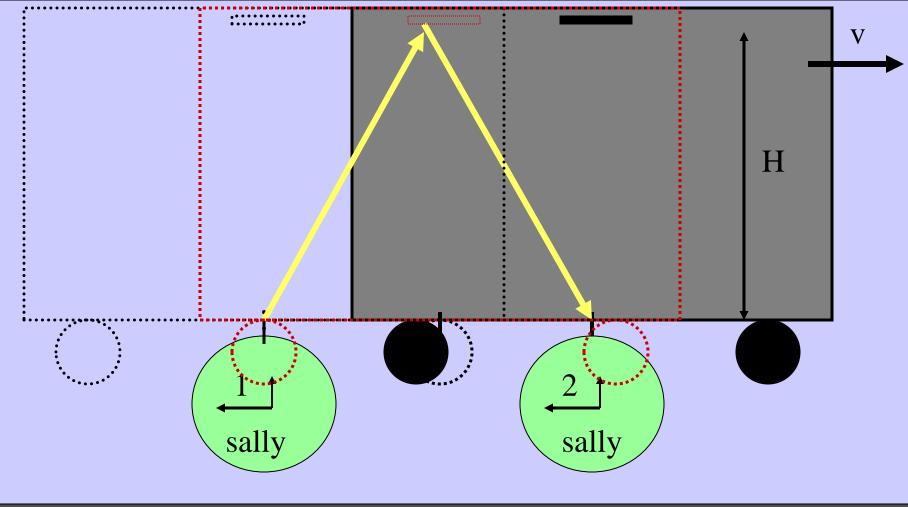
#### Sally watches the train pass and makes the same measurement.



#### Light is emitted



#### Sally is standing still, so it takes two clocks.



#### Light is emitted

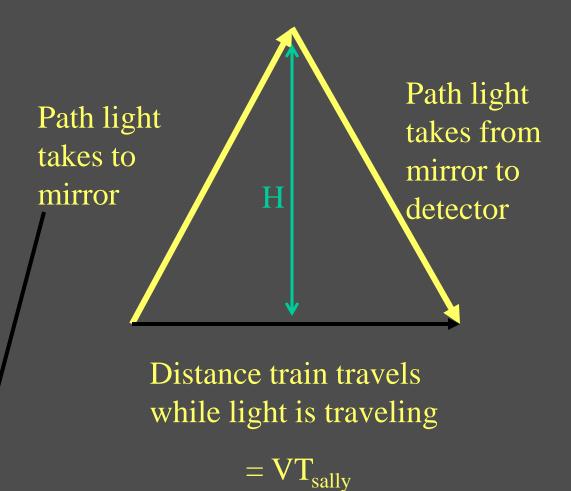
#### Light returns



Sally sees the light traveling further. If light travels at a constant speed, the same "event" must seem to take longer to Sally than Sam!

Time is relative ... not absolute!!

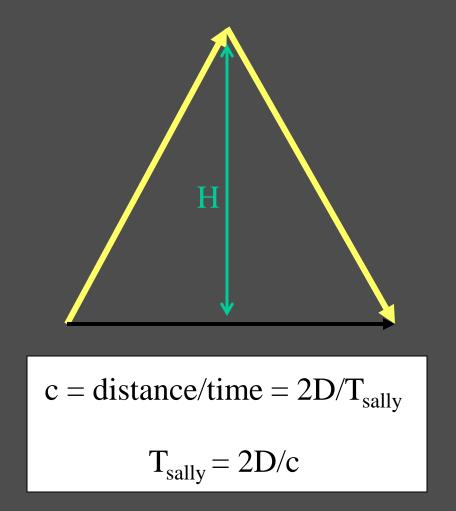
#### From Sally's point of view



$$D = \sqrt{H^2 + (\frac{1}{2} vT_{sally})^2}$$

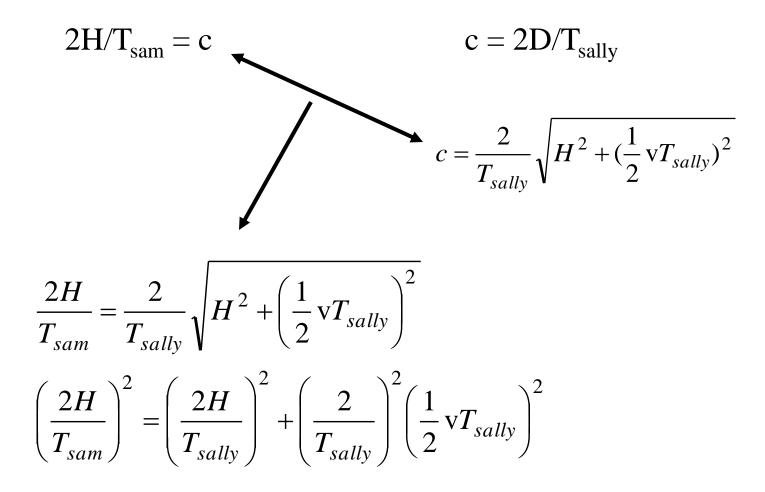
Makes use of Pythagorian theorem

#### From Sally's point of view



Sam (on train)

Sally (on ground)



$$\left(\frac{2H}{T_{sam}}\right)^2 = \left(\frac{2H}{T_{sally}}\right)^2 + v^2$$

$$\left(\frac{1}{T_{sam}}\right)^2 = \left(\frac{1}{T_{sally}}\right)^2 + \frac{v^2}{\left(2H\right)^2}$$

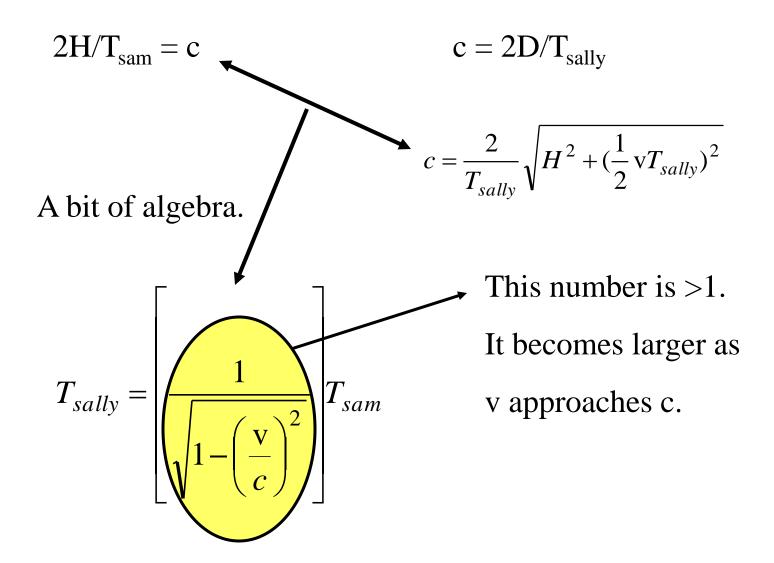
Recall  $2H/T_{sam} = c$  or  $2H=cT_{sam}$ 

$$\left(\frac{1}{T_{sam}}\right)^{2} = \left(\frac{1}{T_{sally}}\right)^{2} + \frac{v^{2}}{(cT_{sam})^{2}}$$

$$c^{2} = \frac{c^{2}T_{sam}^{2}}{T_{sally}^{2}} + v^{2} \longrightarrow \begin{bmatrix} T_{sally} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^{2}}} \end{bmatrix} T_{sam}$$

Sam (on train)

Sally (on ground)



Think about it!

Sam and Sally measure the time interval for the same event.

The ONLY difference between Sam and Sally is that one is moving with respect to the other.

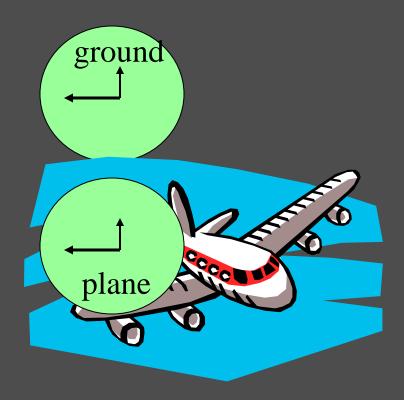
Yet,  $T_{sally} > T_{sam}$ 

The same event takes a different amount of time depending on your "reference frame"!!

Time is not absolute! It is relative!

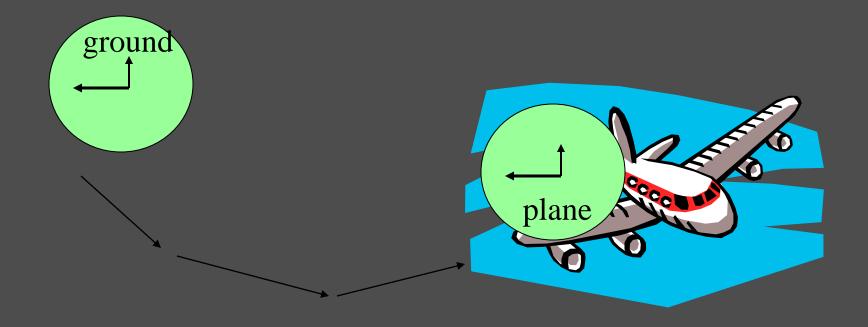
Can this be true??

Experiment says YES!

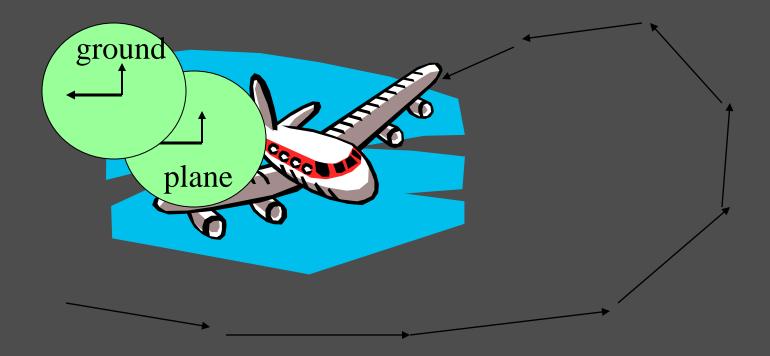


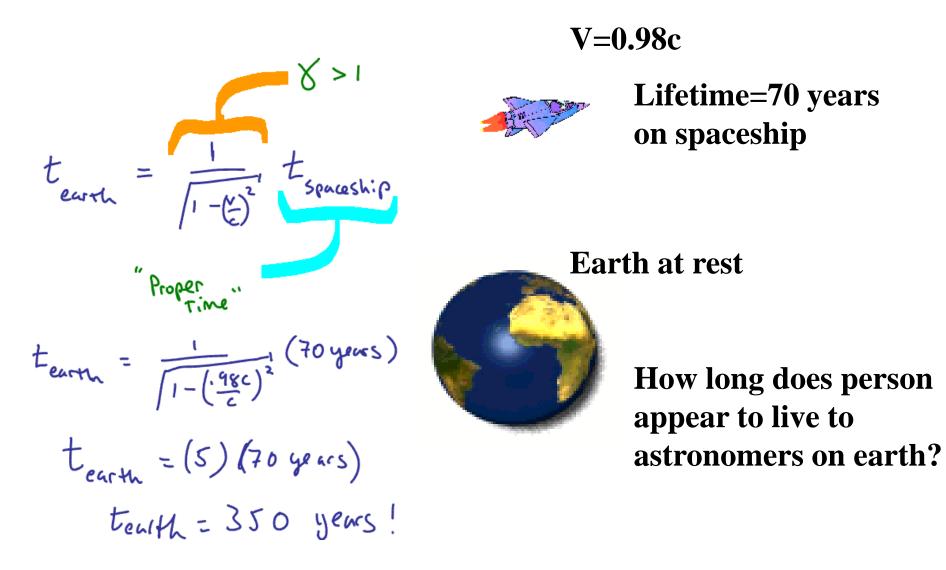
Can this be true??

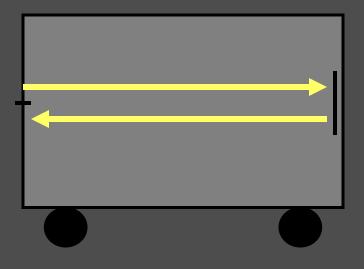
Experiment says YES!



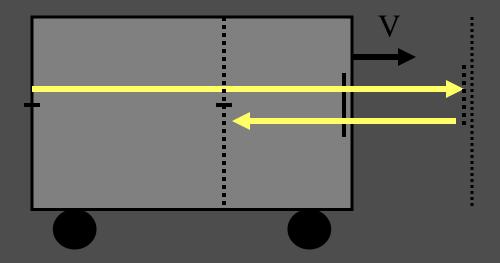
#### Less time elapsed on the clocks carried on the airplane







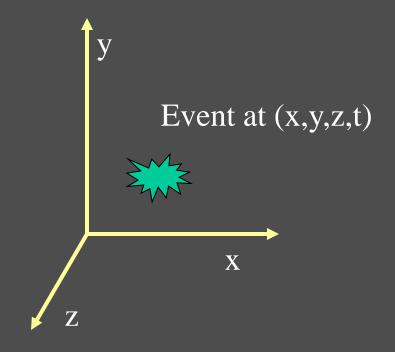
Measure the length of a boxcar where you are on the car.

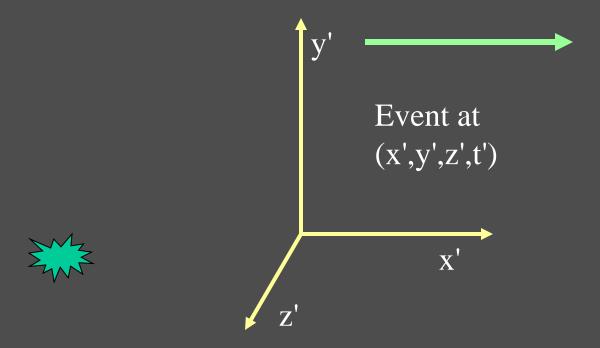


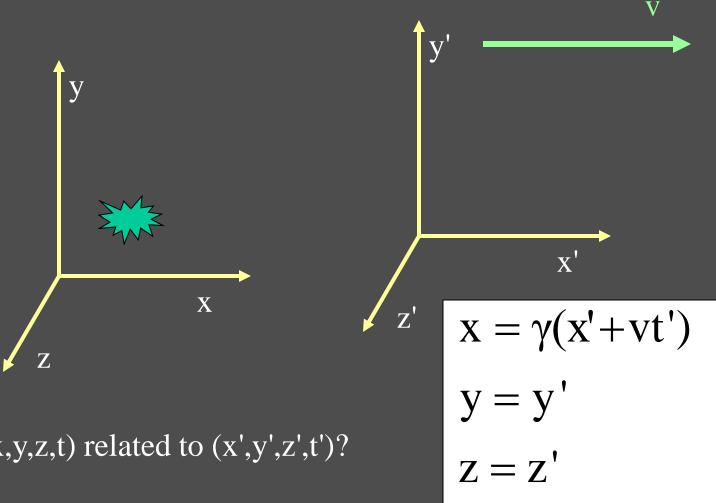
Measure the length of a boxcar moving by you.

#### Length is relative, too!









 $t = \gamma(t' + v \frac{x}{r^2})$ 

How are (x,y,z,t) related to (x',y',z',t')?

# Lorentz transformations **y** Why is this vitally important for science as a whole and +vt') physics in particular? How are (x,y,z,t) related to (x',y',z',t')? z = z'

 $t = \gamma(t' + v \frac{x}{c^2})$ 

Space and time get all mixed up when you relate observations made from different points of view

 $(\mathbf{x'} + \mathbf{vt'})$ 

 $\mathbf{Z}'$ 

# Howbre (x, y z, t) related to (x' y' z', t')? Spacetine

X

All other things that can be observed must have "relativisitic transformations", too!

$$x = \gamma(x' + vt')$$
$$y = y'$$

$$z = z$$

$$t = \gamma(t' + v \frac{x}{c^2})$$

 $\mathbf{Z}'$ 

p

 $E = mc^2$ 

 $\mathbf{V}$ 

LEIPZIG, 1905. VERLAG VON JOHANN AMBROSIUS BARTH.



MIT FUNF FIGURENTAFELN.

REPAUSONONERS VON PAUL DRUDE.

VIERTE FOLGE. BAND 17. DEE GANZEN RETHE 322. BAND.

F. L. C. GREN, L. W. GILBERT, J. C. POGGENDORFF, G. UND E. WIEDEMANN.

F. KOHLRAUSCH, M. PLANCK, G. QUINCKE, KURATORIUM:

W. C. RÖNTGEN, E. WARBURG.

UNTER MITWIRKUNG DER DEUTSCHEN PHYSIKALISCHEN GESELLSCHAFT

UND INSHESONDERE YOS

M. PLANCK

HYSIK. BEORÖNDET UND FORTORFÜHRT DURCH

ANNALEN

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells - wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt - in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen icht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein clektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft an sich keine Energie entspricht, die aber - Gleich Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten vorausgesetzt - zu elektrischen Strömen von derselben

und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten die elektrischen Kräfte: Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuch eine Bewegung der Erde relativ zum "Lichtmedium" zu kon statieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir vellen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden "Prinzip Relativität" genannt werden wird) zur Voraussetzung erund auferdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

891

The Theory of General Relativity - Einstein 1916

1916.

ANNALEN PHYSIK a an the

T. L. C. SEEN, L. W. CILBERT, L. L. POGGENDORFF, G. C. R. WIEDENINN, P. BELDE. RESCART THE POSTORFULLT DUNCH

VIERTE FOLOE.

BAND 49. DER BARCEN SKIRE SLL SAFE.

KURATORIUM: M. PLANCK, G. QUINCKE, W. C. RÖNTGEN, W. VOIGT, E. WARBURG.

ONTER MITWIERGNO. DES DEUTSCHEN PHYSIKALISCHEN GESELLECHAFT

RESIDENCES NOR W. WIEN UND M. PLANCK.

WIT EINEM FORTBAT UND ERES FUTURESTAYELS.



LEIPZIG, 1916. VERLAG VON JOHANN AMBROSIUS BARTH. ANNALEN DER PHYSIK, Nº 7. VIERTE FOLGE. BAND 49.

1. Die Grundlage der allgemeinen Belativitätstheorie; von A. Einstein,

Die im nachfolgenden dargelegte Theorie bildet die denkbar weitgehendste Verallgemeinerung der heute allgemein als Belstivitätstheorie" dezeichneten Theorie; die letztere nenne h im folgenden zur Unterscheidung von det ersteren "spezielle lativitätstheorie" und setze sie als bekannt voraus. Die allgemeinerung der Relativitätstheorie wurde sehr erfert durch die Gestalt, welche der speziellen Relativitätsie durch Minkowski gegeben wurde, welcher Matheer zuerst die formale Gleichwertigkeit der täumlichen naten und der Zeitkoordinate klar erkannte und für dbau der Theorie nutztar machte. Die für die all-Relativitätstheorie nötigen mathematischen Hilfsen fertig bereit in dem "absoluten Differentialkalkül" iuf den Forschungen von Gauss, Riemann und charisse fel über nichteuklidische Mannigfaltigkeiten ruht und the Baren und Levi-Civita in ein System gebracht und Probleme der theoretischen Physik angewendet habe im Abschnitt B der vorliegenden Abhandbein aufe für uns nötigen, bei dem Physiker nicht als bekannt iden nathematischen Hilfsmittel in möglichst durchsichtiger Weise entwickelt, so daß ein matischer Literatur für das Verständnis der schandlung nicht erforderlich ist. Endlich sei isedie Janklar meines Freundes, des Mathematikers lacht, der mir durch seine Hilfe nicht mis inclusion of einschlägigen mathematics

