

# Relativity — Lecture 6

- Summary of Lecture 5
- Relativistic Doppler Effect
- Relativistic Mechanics

29/11/2007

**Imperial College**  
**London**

100 years of living science

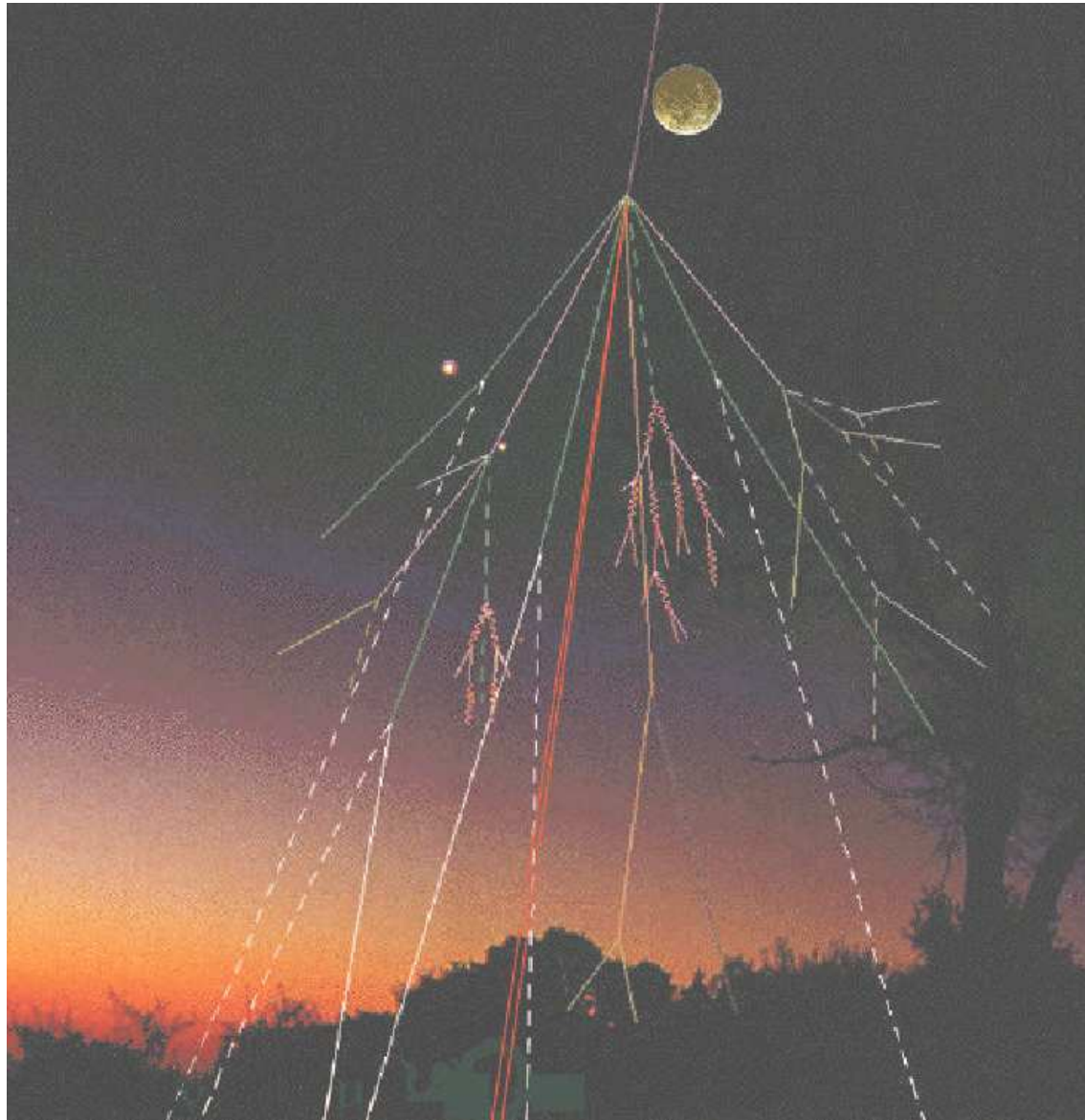
**Patrick**  
**Koppenburg**

**100**

# Lecture 5

## Revision

# Cosmic Muons



# Cosmic Muons



# Relative motion



$$v'_x = \frac{v_x - u}{1 - \frac{u v_x}{c^2}}, \quad v'_y = \frac{v_y}{\gamma \left( 1 - \frac{u v_x}{c^2} \right)}, \quad v'_z = \frac{v_z}{\gamma \left( 1 - \frac{u v_x}{c^2} \right)}$$

# Relative motion



$$v'_x = \frac{v_x - u}{1 - \frac{u v_x}{c^2}}, \quad v'_y = \frac{v_y}{\gamma \left(1 - \frac{u v_x}{c^2}\right)}, \quad v'_z = \frac{v_z}{\gamma \left(1 - \frac{u v_x}{c^2}\right)}$$

$$v'_x = \frac{v_x - u}{1 - \frac{u v_x}{c^2}} = \frac{-\frac{1}{2}c - \frac{1}{2}c}{1 - \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{2}\right)} = \frac{-c}{1 + \frac{1}{4}} = -\frac{4}{5}c,$$

# Relative motion



$$v'_x = \frac{v_x - u}{1 - \frac{u v_x}{c^2}}, \quad v'_y = \frac{v_y}{\gamma \left( 1 - \frac{u v_x}{c^2} \right)}, \quad v'_z = \frac{v_z}{\gamma \left( 1 - \frac{u v_x}{c^2} \right)}$$

The non-relativistic ( $u \ll c$ ) limit is:

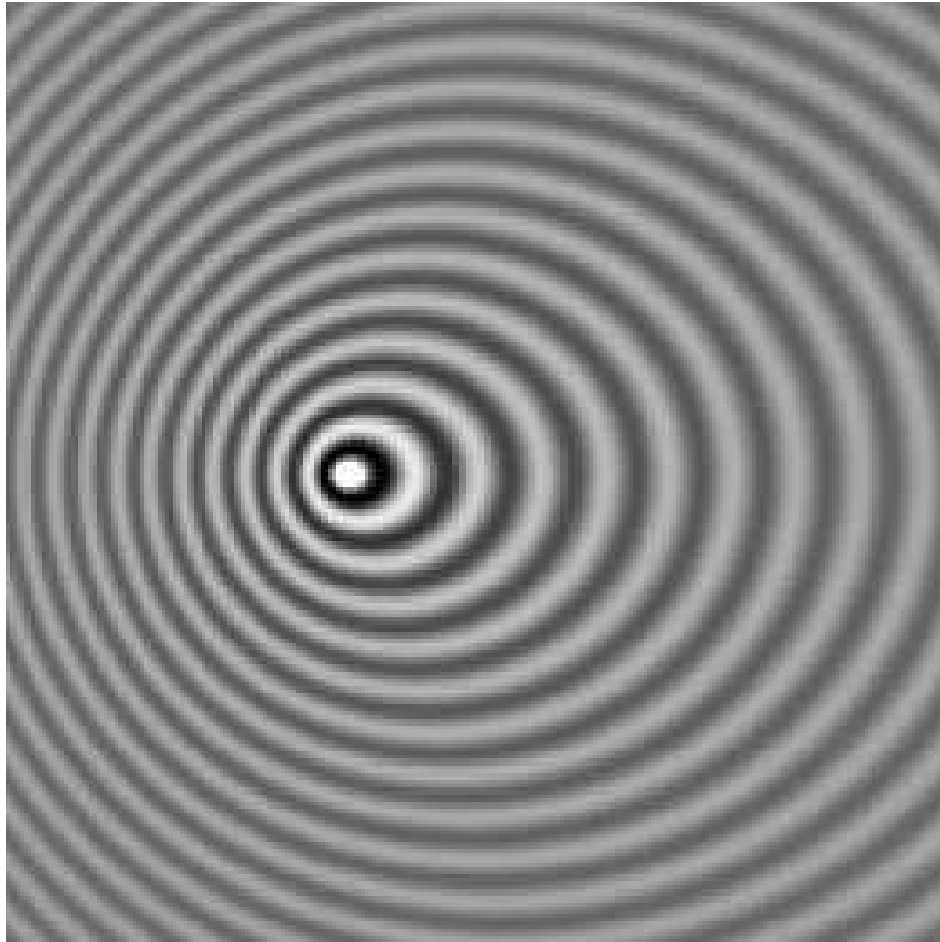
$$v'_x = v_x - u, \quad v'_y = v_y, \quad v'_z = v_z.$$

# Absolute Speed Limit

- Nothing moves faster than  $c$ , according to any observer.
- $c$  is the speed limit, a parameter of relativity theory.
- It is an *experimental* observation that light travels at speed  $c$ .



# Classical Doppler Effect



**Classical:**

Moving siren, observer at rest:

$$\frac{\Delta f}{f_0} \simeq \pm \frac{u}{v_s} \quad \rightarrow \quad \frac{f}{f_0} = \frac{v_s \pm u}{v_s}$$

Still siren, moving observer:

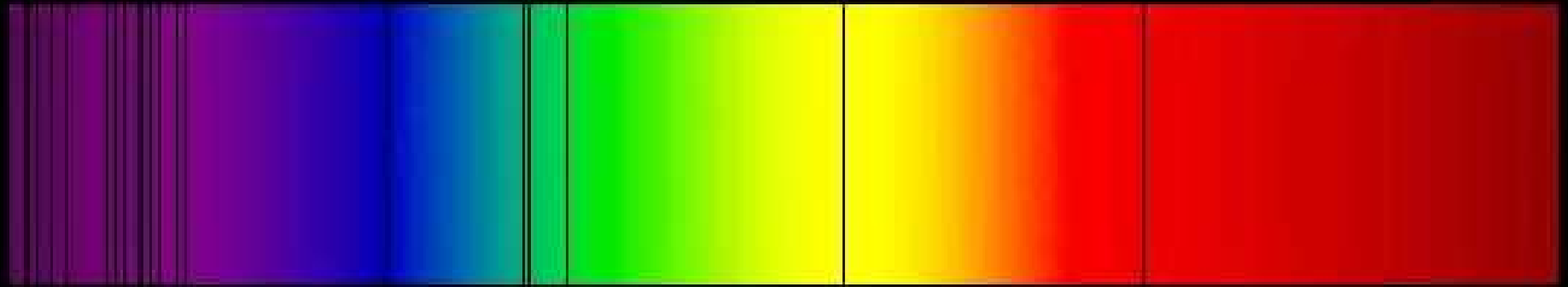
$$\frac{f}{f_0} = \frac{\pm u}{u + v_s}$$

**Does this violate relativity?**

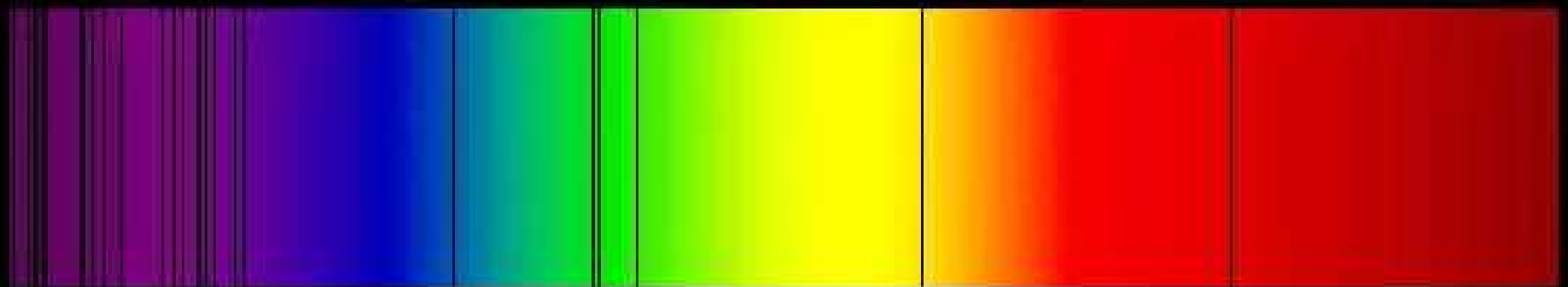
# Lecture 6

# Red-shift

Absorption Lines from our Sun



Absorption Lines from a supercluster of galaxies, BAS11  
 $v = 0.07 c$ ,  $d = 1$  billion light years



# Red-shift

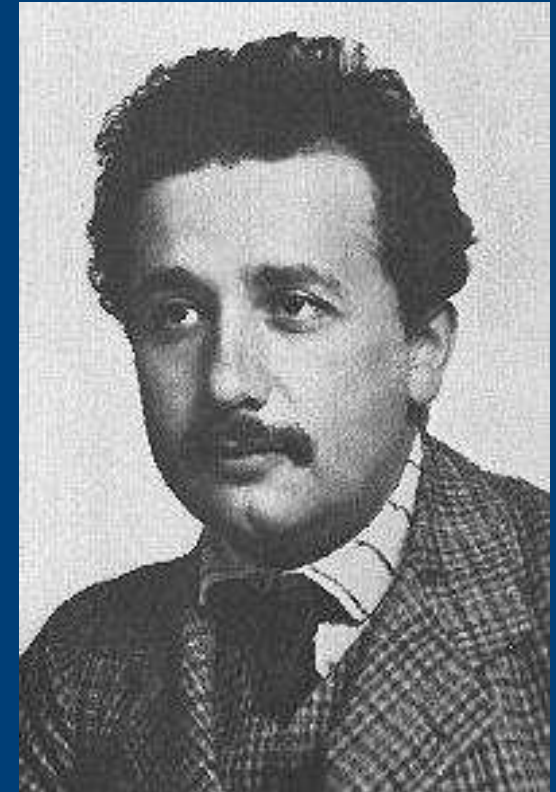


RXJ0152-13 galaxy cluster by Hubble Space Telescope

# 1905

# Annus Mirabilis

In 1905 Albert Einstein worked as a clerk (2nd category) in the patent office in Bern. He couldn't find a position as a PhD student.

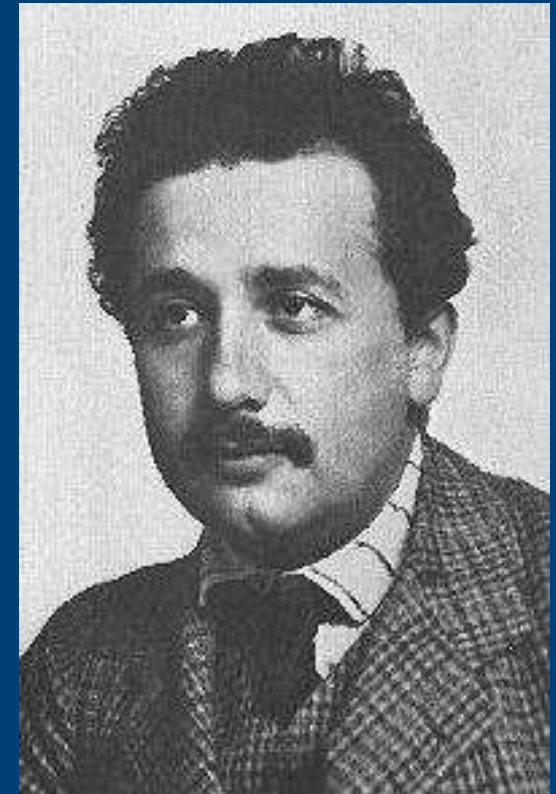


# Annus Mirabilis

## April: Photoelectric effect

Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt (*On a heuristic viewpoint concerning the production and transformation of light*) *Annalen der Physik*, 17:132-148 (1905)

He would get the Nobel prize in 1921 for this paper, essentially.

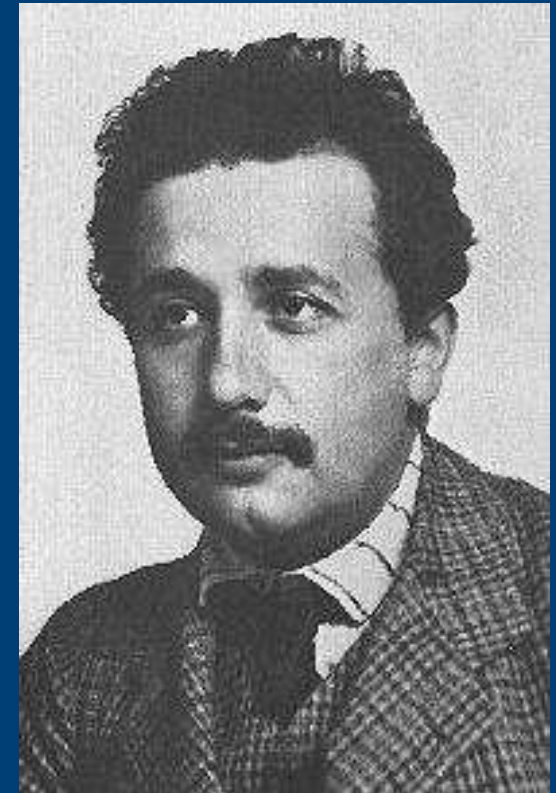


# Annus Mirabilis

**April: Photoelectric effect**

**May: Brownian motion**

Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen (*On the motion of small particles suspended in liquids at rest required by the molecular-kinetic theory of heat*) *Annalen der Physik*, 17:549-560. (1905)





# Annus Mirabilis

April: Photoelectric effect

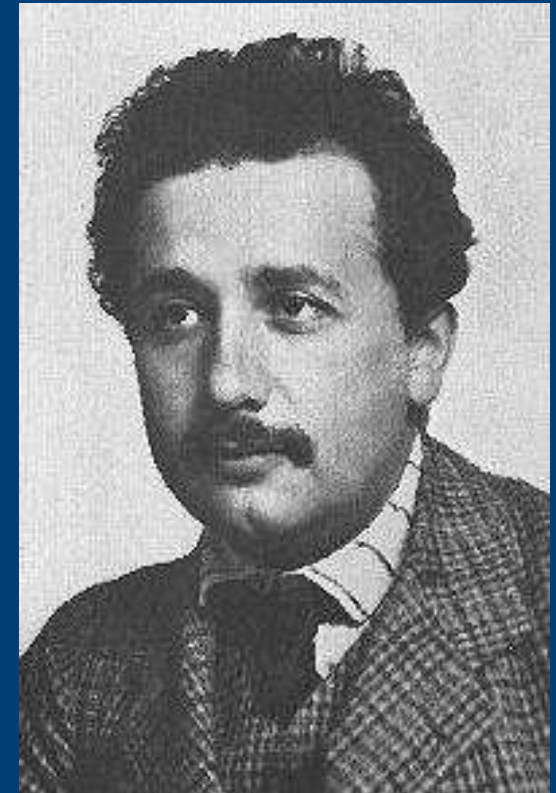
May: Brownian motion

June: Relativity

Zur Elektrodynamik bewegter Körper (*On the Electrodynamics of Moving Bodies*) *Annalen der Physik*. 17:891-921. (June 30, 1905)

### *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 nicht 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



# Annus Mirabilis

April: Photoelectric effect

May: Brownian motion

June: Relativity

September:  $E = mc^2$

Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt abhängig?  
(*Does the Inertia of a Body Depend Upon Its Energy Content?*) Annalen der Physik, 18:639-641. (September 27, 1905)

Ann. Phys. (Leipzig) 14, Supplement, 225–228 (2005)

## ANNALEN DER PHYSIK.

BEGRÜNDET UND VORGEFÜHRT DURCH  
F. A. C. GREN, L. W. GILBERT, J. C. POGGENDORFF, G. UND E. WIEDEMANN.

VIERTE FOLGE.

BAND 18.

DER GANZEN REIHE 228. BAND.

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

UNTER MITWIRKUNG  
DER DEUTSCHEN PHYSIKALISCHEN GESELLSCHAFT

UND INSBESONDERE VON

M. PLANCK

HERAUSGEBEN VON

PAUL DRUDE.

MIT ACHT FIGURENTAFELN.



LEIPZIG, 1905.

VERLAG VON JOHANN AMBROSIOUS BARTH.

© 2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim