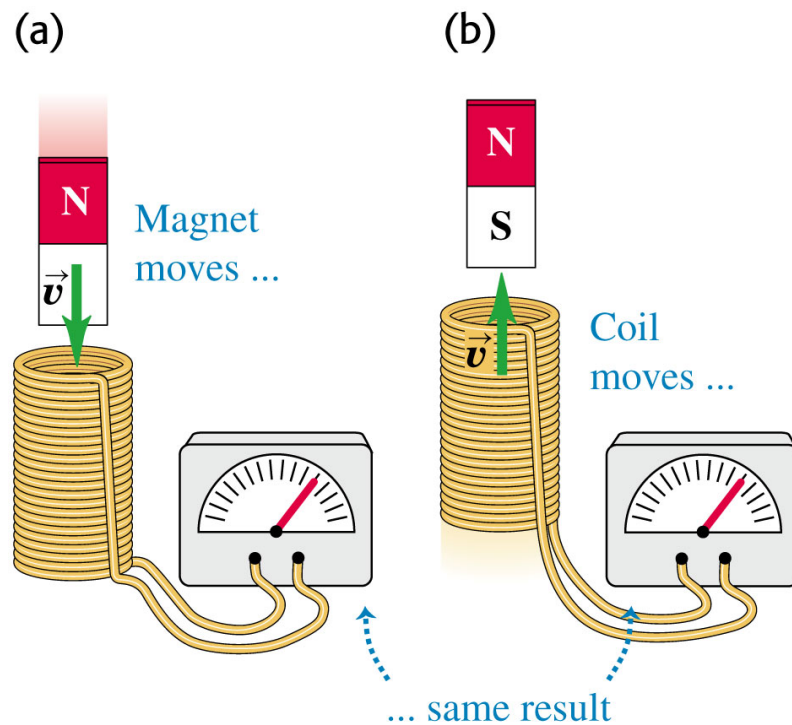


# Relativitetsteori

---

- Einstein's två postulat
  - Hur uppför sig partiklar när man närmar sig  $v \sim c$ ?
  - Hur kan två observatörer uppfatta händelser olika:
    - - klockor i rörelse verkar gå saktare
    - - rörelse påverkar också längd (verkar kortare)
  - II) Räkna med olika referenssystem, relativistisk Doppler effekt, rörelsemängd och energi
-

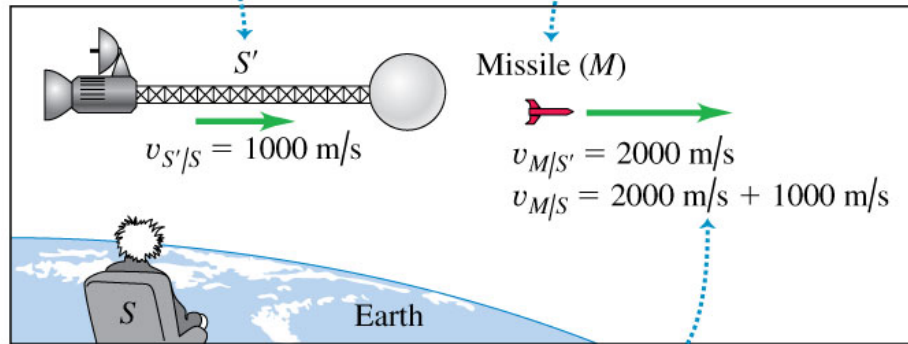
# Einstein's first postulate



# Einstein's andra postulat

(a) A spaceship ( $S'$ ) moves with speed  $v_{S'/S} = 1000$  m/s relative to an observer on earth ( $S$ ).

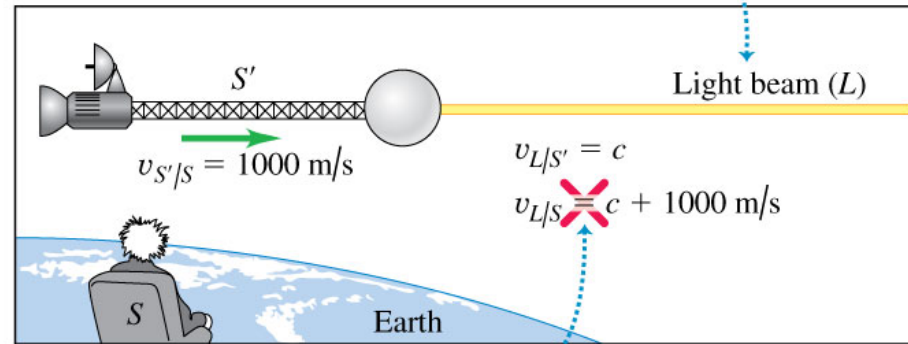
A missile ( $M$ ) is fired with speed  $v_{M/S'} = 2000$  m/s relative to the spaceship.



**NEWTONIAN MECHANICS HOLDS:** Newtonian mechanics tells us correctly that the missile moves with speed  $v_{M/S} = 3000$  m/s relative to the observer on earth.

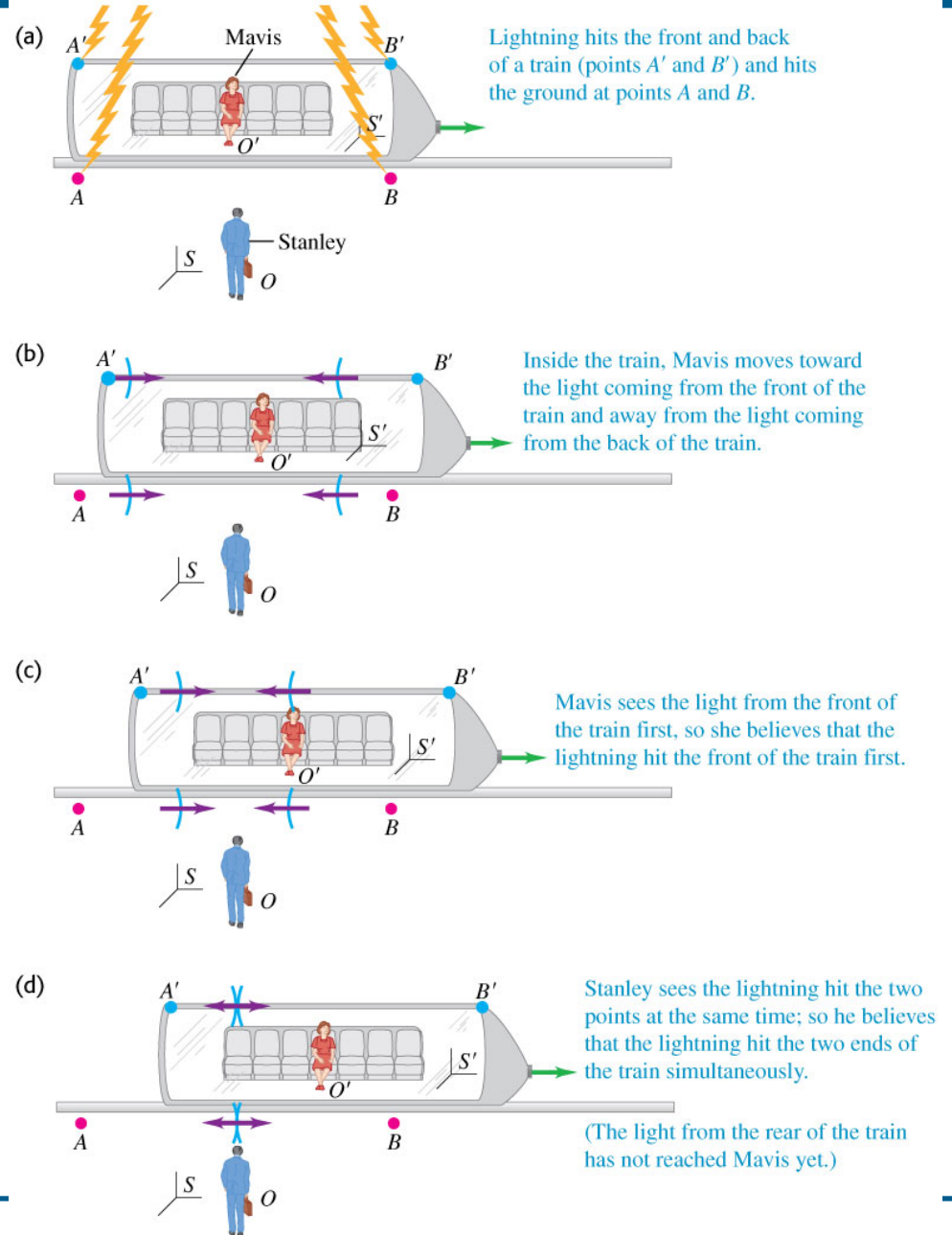
(b)

A light beam ( $L$ ) is emitted from the spaceship at speed  $c$ .



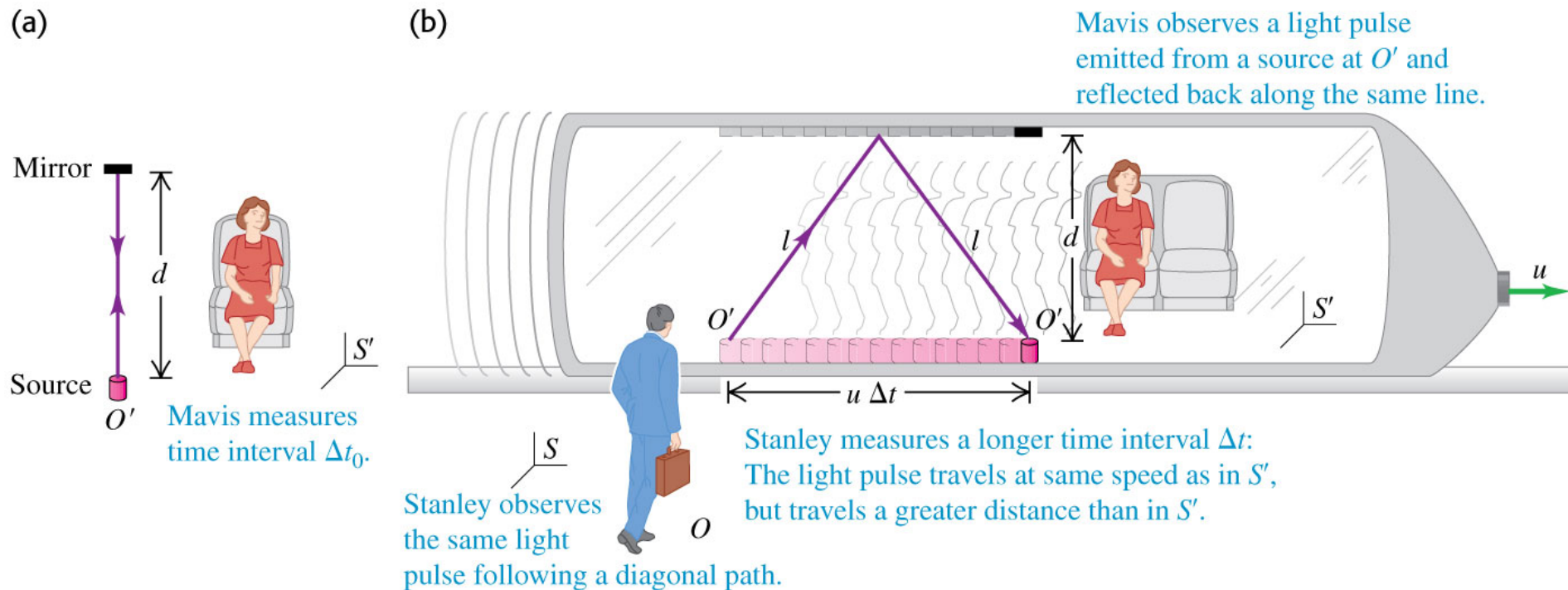
**NEWTONIAN MECHANICS FAILS:** Newtonian mechanics tells us *incorrectly* that the light moves at a speed greater than  $c$  relative to the observer on earth ... which would contradict Einstein's second postulate.

# Tanke-experiment : simultanhändelser



# Relativitet: tidsintervall

- Två observatörer (Mavis & Stanley) mäter olika tidsintervall p.g.a. deras relativa rörelse. (Fig 37.6)
- *Egentiden* (proper time) är den tid som mäts i det referenssystem där kroppen är i vila.



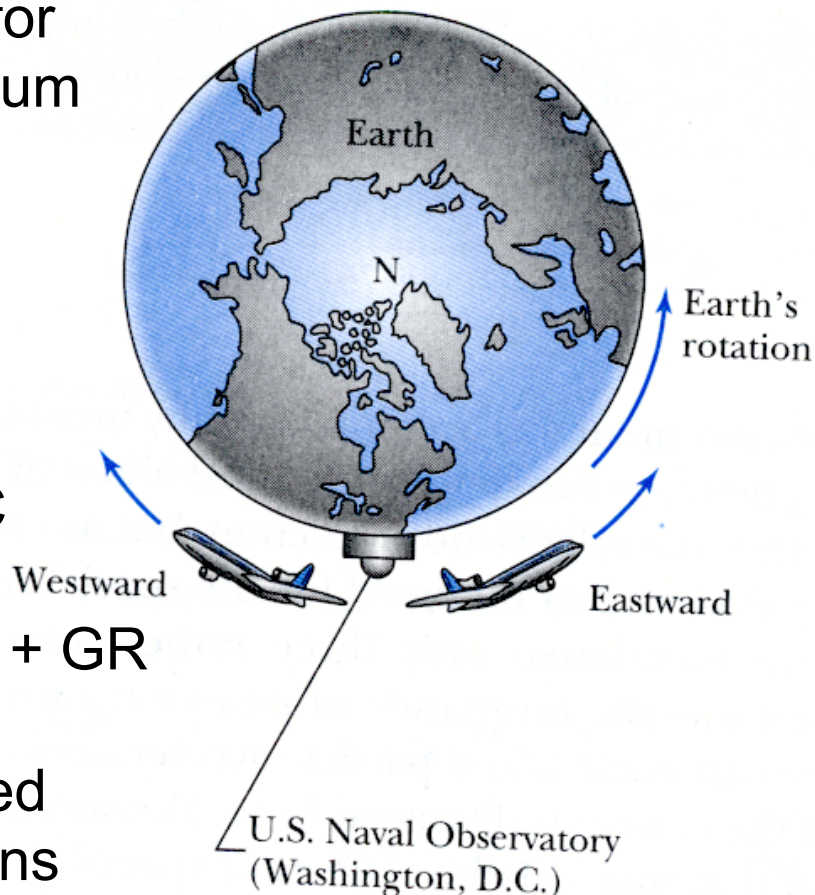
# Time Experiment

Atomic Clock : measure time interval for certain atomic level transitions in Cesium atom

- Two planes take off from DC, travel east and west with the atomic clock
  - Eastward trip took 41.2 hrs
  - Westward trip took 48.6
- compared to similar clock kept in DC
  - Need to account for Earth's rotation + GR etc

Travel	Predicted	Measured
Westward	$275 \pm 21$ ns	$273 \pm 7$ ns
Eastward	$-40 \pm 23$ ns	$-59 \pm 10$ ns

Flying clock ticked faster or slower than reference clock. Slow or fast is due to Earth's rotation



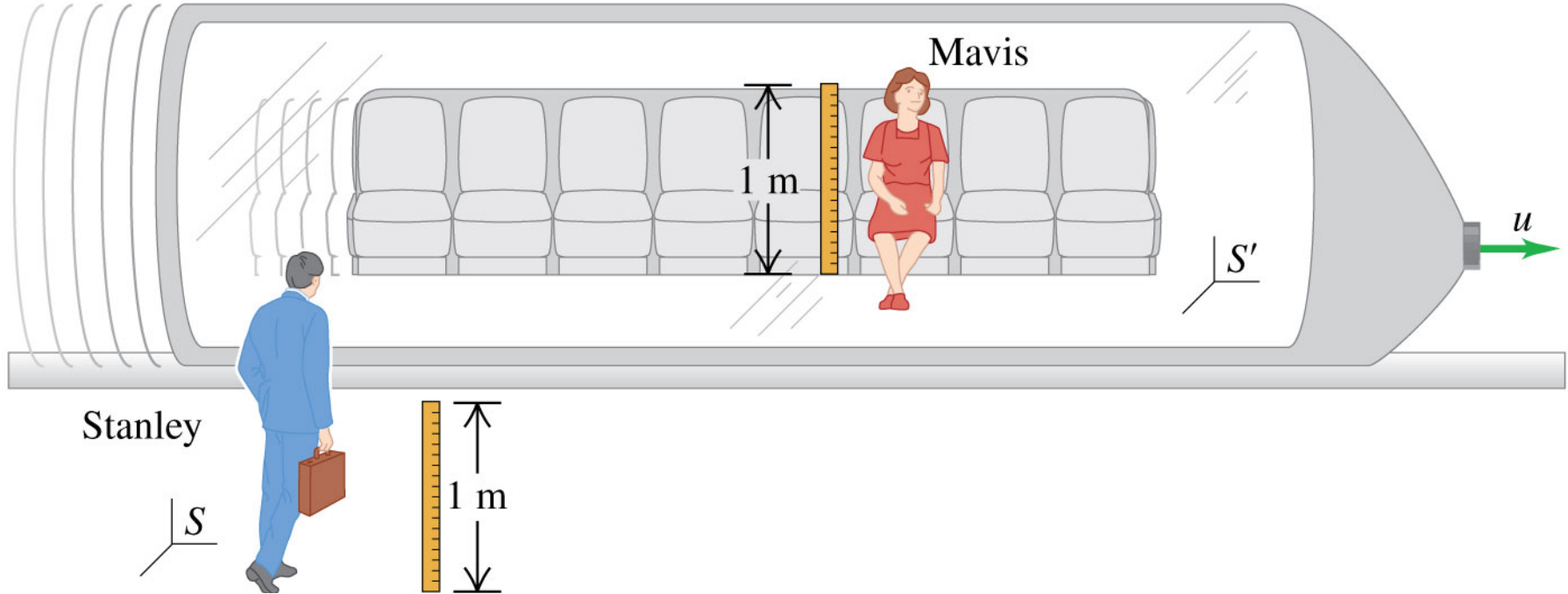






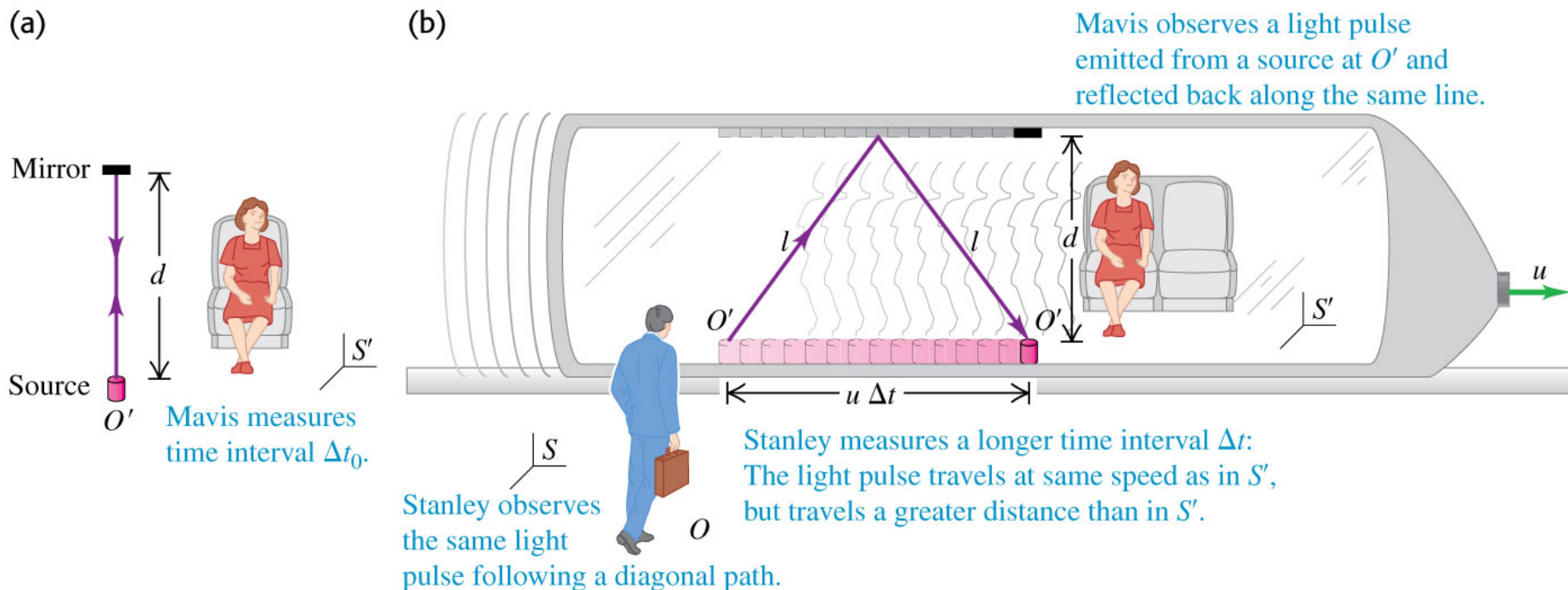
# Längder tvärs emot rörelseriktningen

- Ingen längdsammandragning för längder tvärs emot rörelseriktningen - Fig 37.12.



# Relativitet

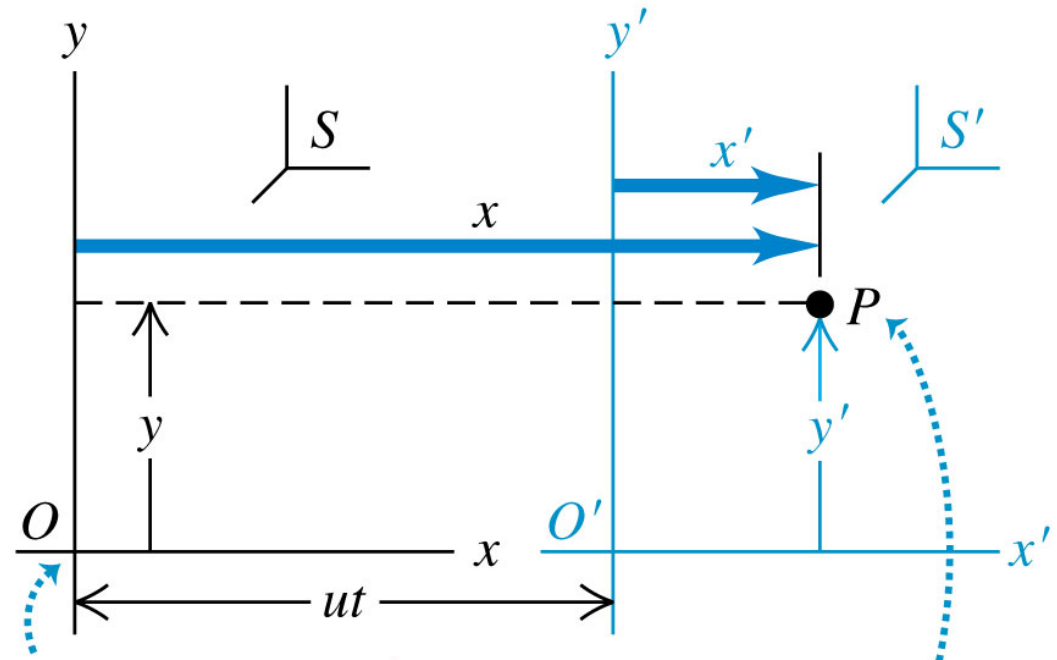
- Två observatörer (Mavis & Stanley) mäter olika tidsintervall p.g.a. deras relativa rörelse. (Fig 37.6)
- Notera att vi får samma resultat om källan är i Stanleys system som om det är i Mavis system (bara byter variabler)



# Lorentz transformationer

- *Lorentz transformationer* – relationer mellan rumstids-koordinater och hastigheter i två olika referenssystem.

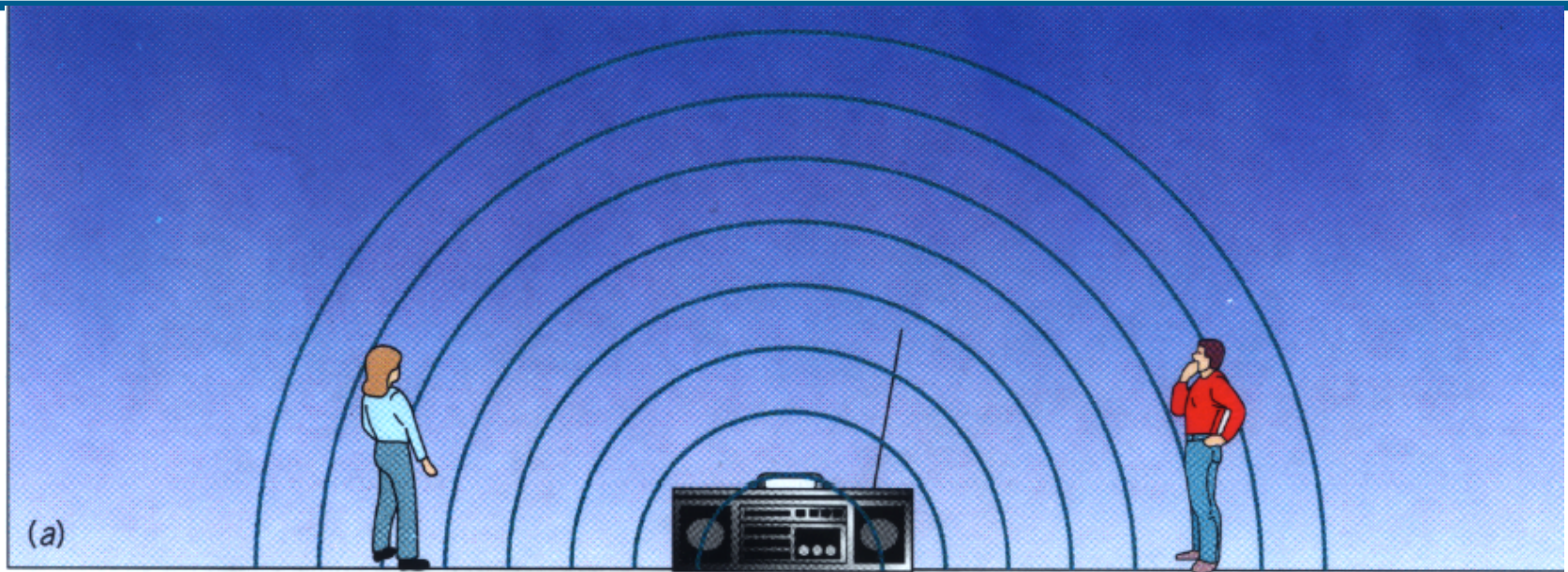
Frame  $S'$  moves relative to frame  $S$  with constant velocity  $u$  along the common  $x$ - $x'$ -axis.



Origins  $O$  and  $O'$  coincide at time  $t = 0 = t'$ .

The Lorentz coordinate transformation relates the spacetime coordinates of an event as measured in the two frames:  $(x, y, z, t)$  in frame  $S$  and  $(x', y', z', t')$  in frame  $S'$ .

# Doppler effekt : ljud



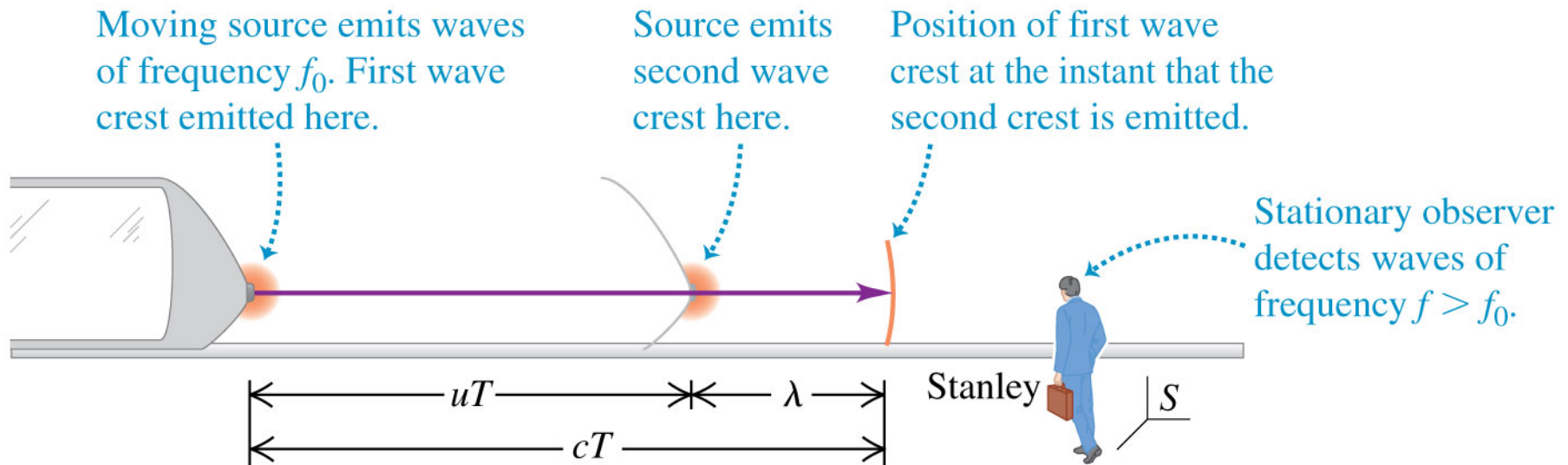
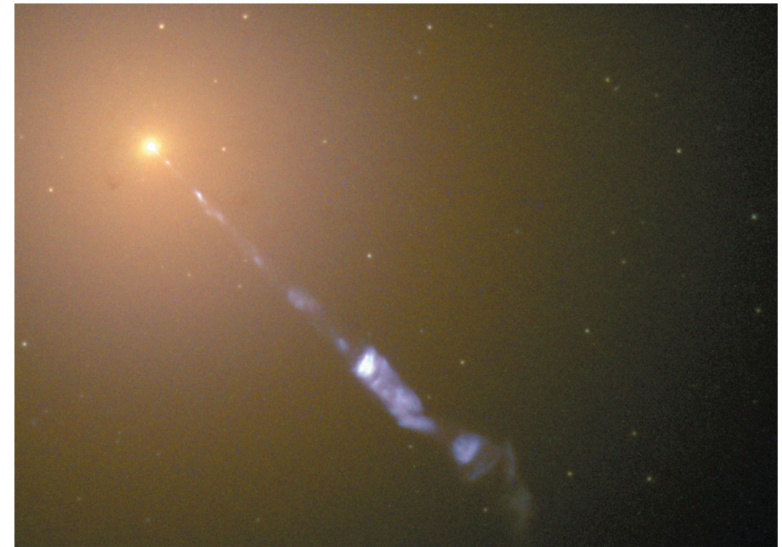
$f_{\text{obs}}$  ÖKAR om källan rör sig mot observatören

$\lambda_{\text{obs}}$  MINSKAR om källan rör sig mot observatören

$$v = f \cdot \lambda$$

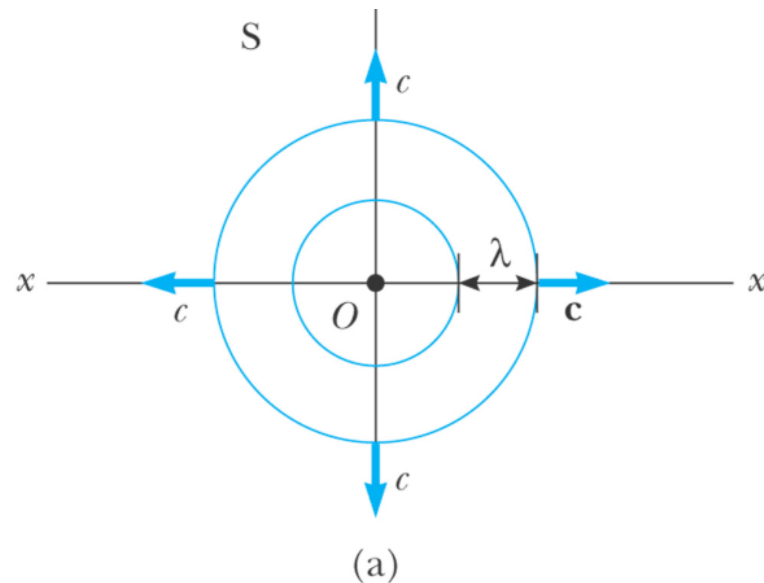
# Doppler effect for electromagnetic waves

- Viktig effekt för astrofysik
- Observatören ser  $f > f_0$  när källan rör sig mot honom

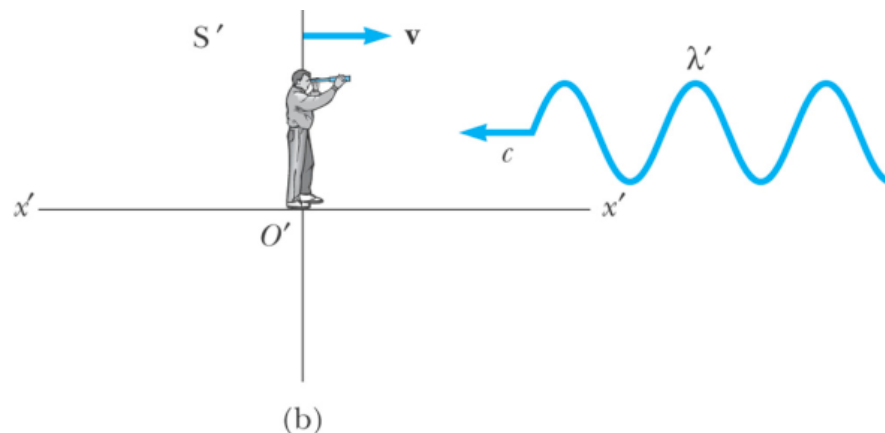


# Doppler effekt härledning – alt. exempel

- Ljushastighet  $c = f \lambda$ ,  $f = 1/T$
- Ljuskälla/system  $S$  i vila
- Observatör  $S'$  närmar sig  $S$  med hastighet  $v$
- $S'$  mäter  $f'$  eller  $\lambda'$ ,  $c = f' \lambda'$
- Förväntar  $f' > f$  eftersom  $S'$  korsar fler vågtoppar när han närmar sig  $S$  än om han varit stilla

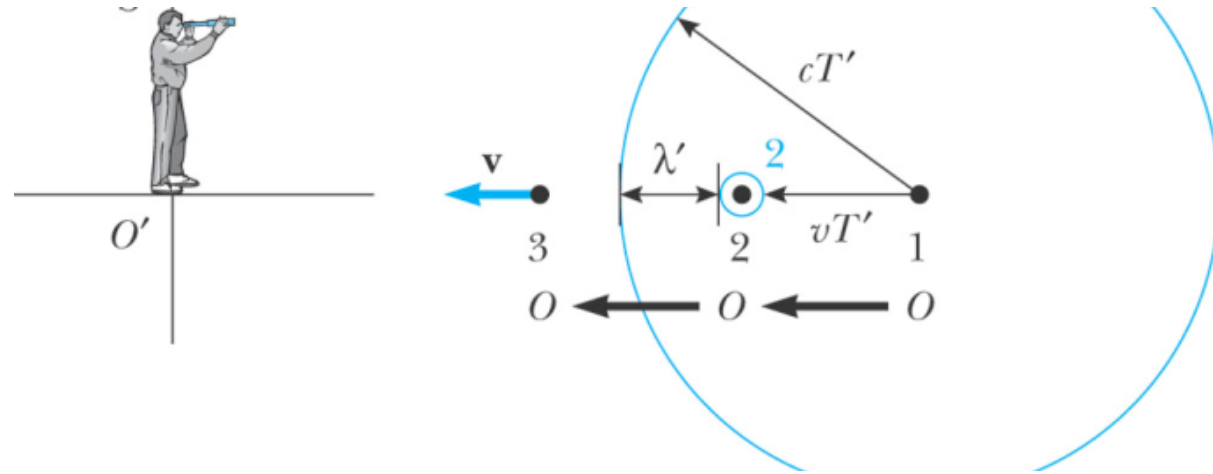


© 2005 Brooks/Cole - Thomson



© 2005 Brooks/Cole - Thomson

# Doppler effekt härledning – alt. exempel



Studera två ljusvågor som sänds ut av S vid punkterna 1&2

I  $S'$  :  $T'$  = tiden mellan två ljusvågor

Under tiden  $T'$ , flyttar sig första ljusvågen  $cT'$  från punkten 1

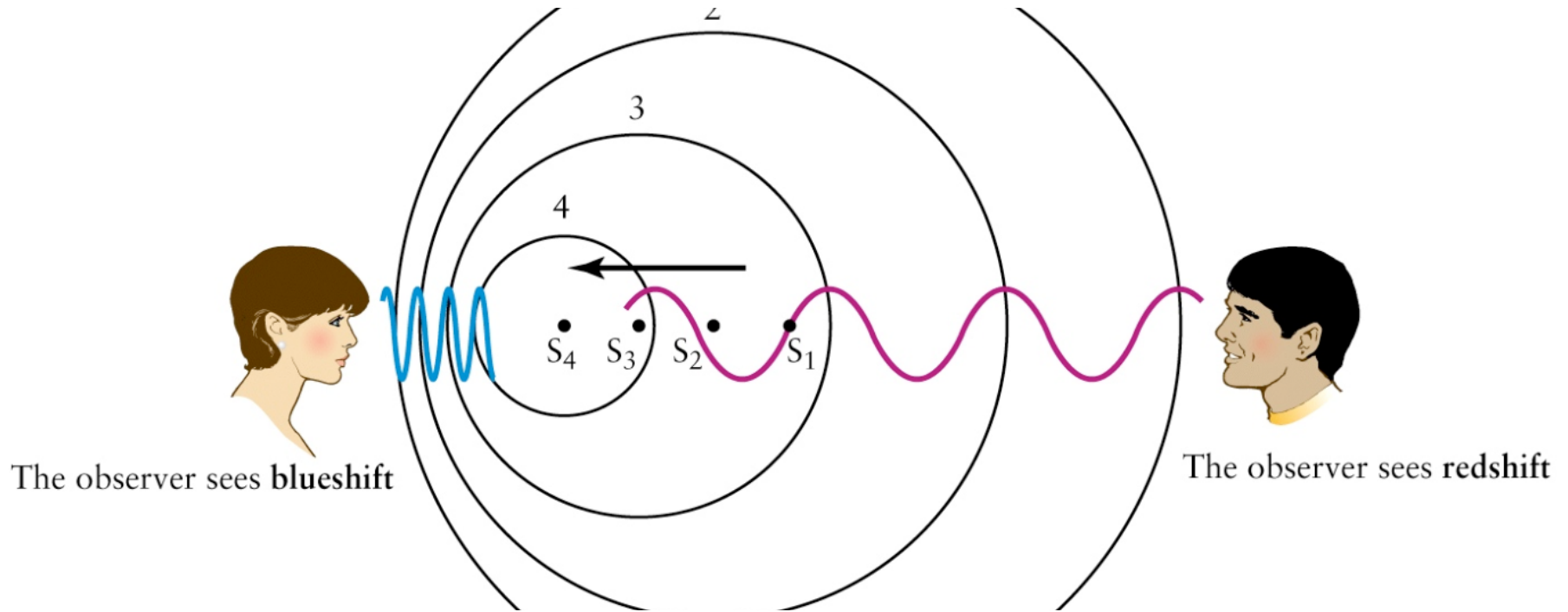
Under samma tid har källan flyttat sig ett avstånd  $vT'$

=> Avståndet mellan följande ljusvågor:

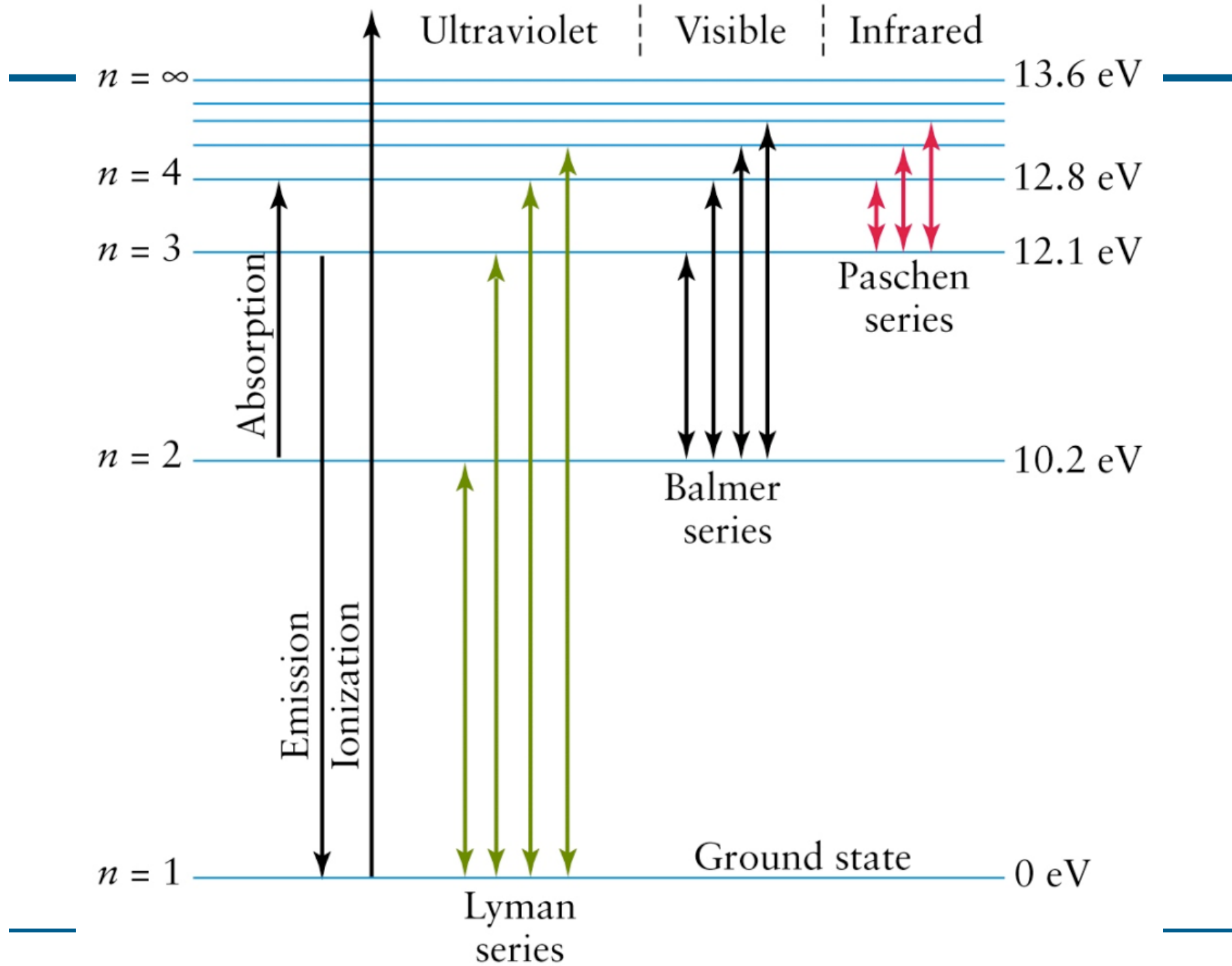
$$\lambda' = cT' - vT' = (c-v) T'$$

# Doppler effekt

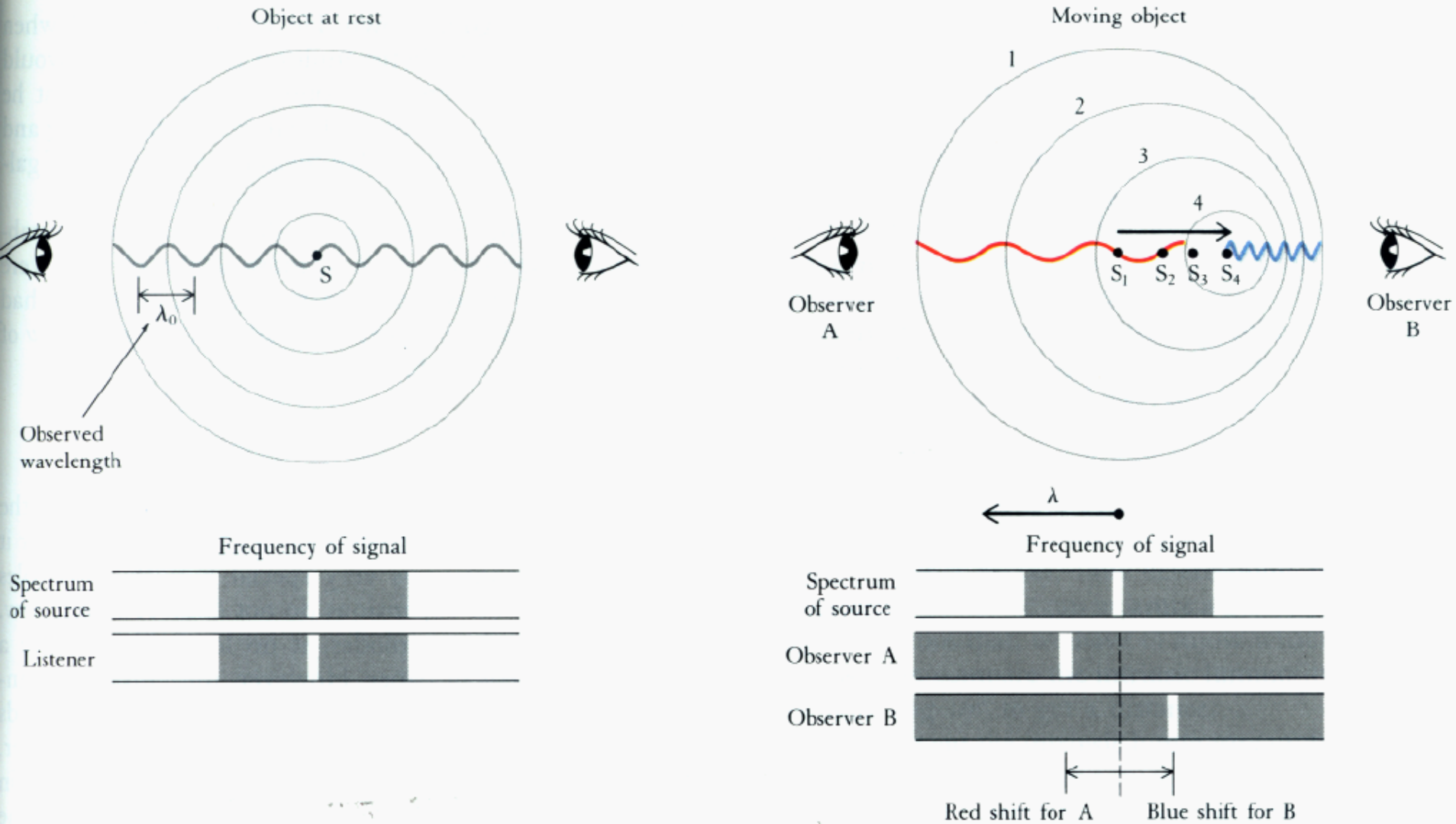
---







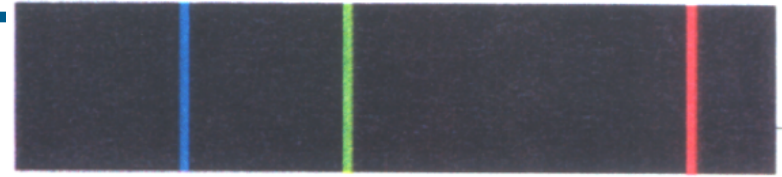
# Doppler effekt



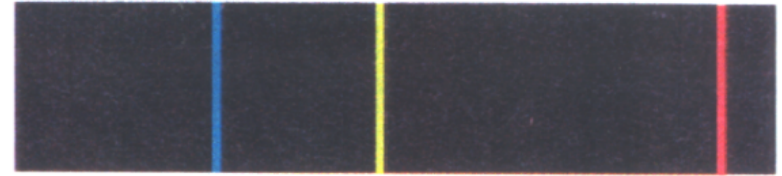
# Doppler effekt

---

Laboratory Spectrum, lines at rest wavelengths



Lines Redshifted, Object moving away from me



Larger Redshift, object moving away even faster



Lines blueshifted, Object moving towards me



Larger blueshift, object approaching me faster

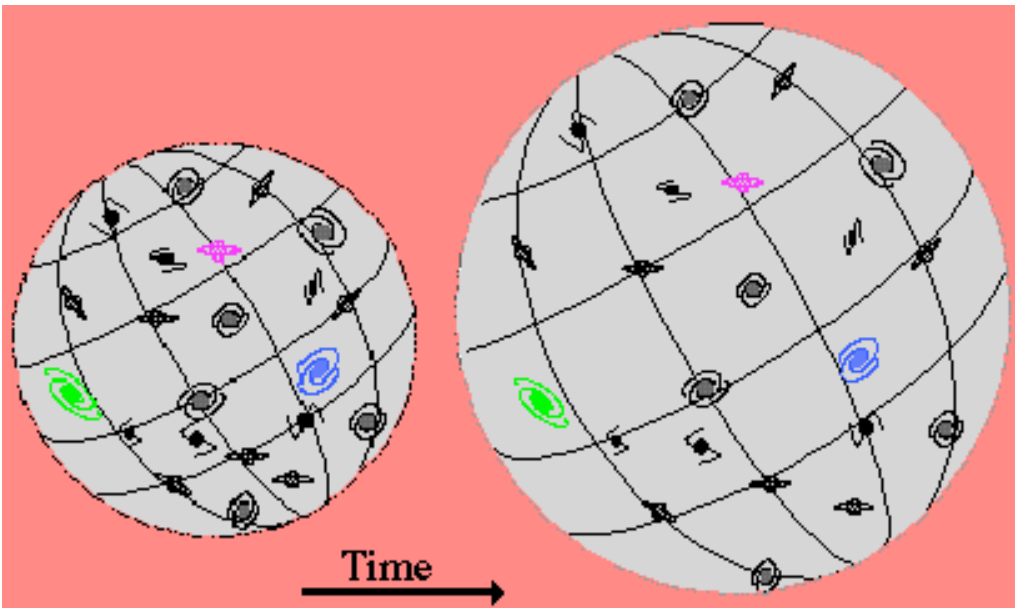


---

$\lambda$  →

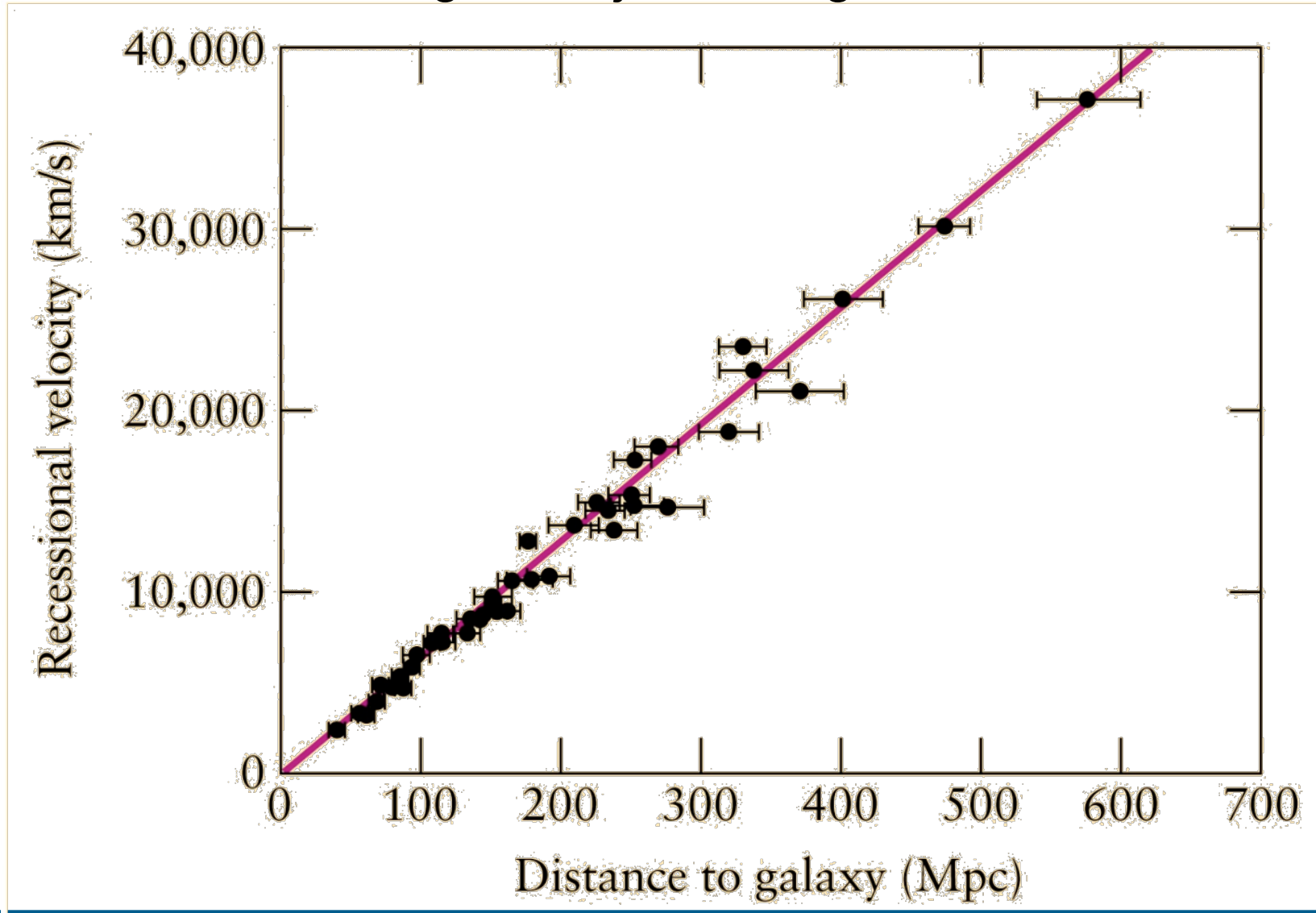
# Hubble & Expanding Universe

---



# Hubble & Expanding Universe

$V = H * d \Rightarrow$  Mer avlägsna objekt rör sig snabbare bort från oss



# Relativistisk rörelsemängd

- $p = \gamma mv$ , generalisering av klassisk rörelsemängd

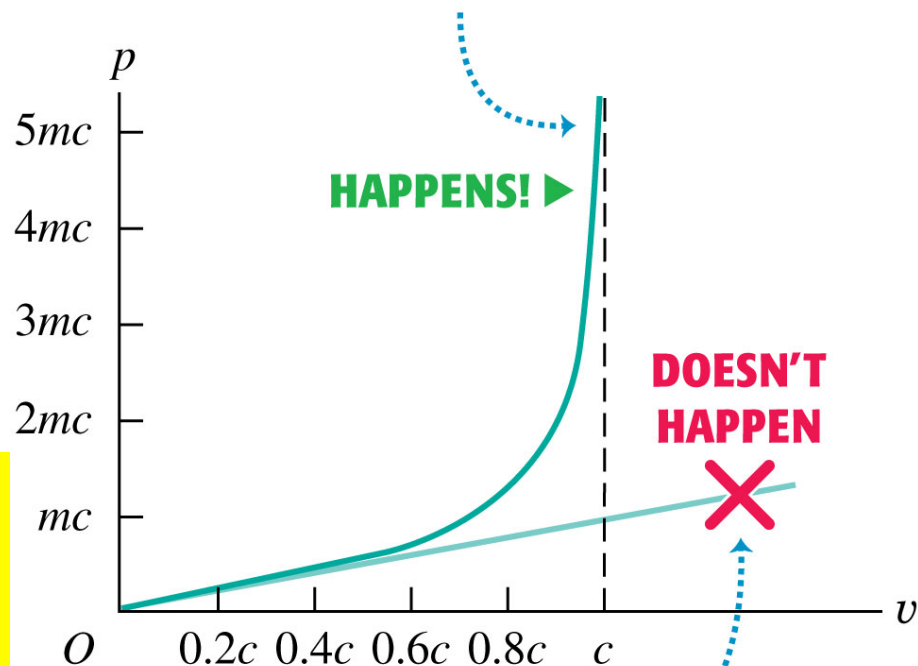
$$p \Rightarrow mv \text{ när } v \ll c \text{ (} \gamma \Rightarrow 1 \text{)}$$

- Relativistisk kinetisk energi för en partikel med massa  $m$ :

$$W = \int_0^u \frac{m u du}{\left[1 - \frac{u^2}{c^2}\right]^{3/2}} = \frac{mc^2}{\left[1 - \frac{u^2}{c^2}\right]^{1/2}} - mc^2$$

$$W = K = (\gamma - 1) mc^2$$

Relativistic momentum becomes infinite as  $v$  approaches  $c$ .

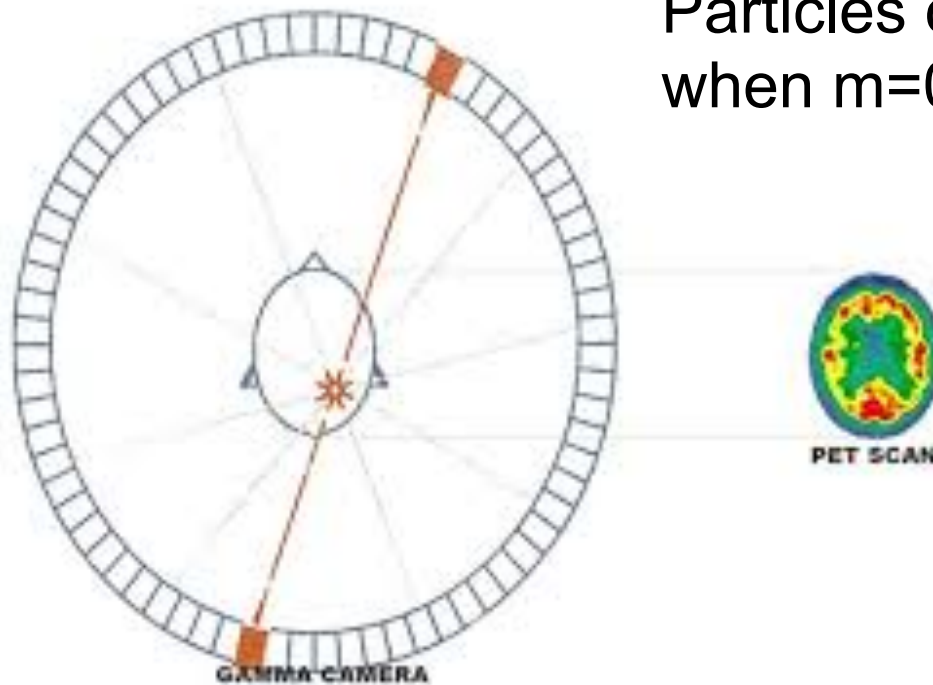


Newtonian mechanics incorrectly predicts that momentum becomes infinite only if  $v$  becomes infinite.

---

# PET Imaging

Particles can have  $p > 0$ , also when  $m = 0$ ...



## Example 37.11 : calculation

---

$p+p + \text{energi} \rightarrow p+p + \pi$  (vila). Vilken hastighet krävs för de kolliderande protonerna?

