

Ækvivalensprincippet 100 år

En Revision af Den Newtonske Mekanik
John E. Niclasen, niclasen@fys.ku.dk
<http://www.fys.ku.dk/~niclasen/>
December 19. 2007

Contents:

- 1. Indledning
- 2. Definition og Fysikkens Ensartethed
 - 2.1 En Mekanisk Kraft
 - 2.2 Fysikkens Ensartethed
- 3. Tre Situationer
 - 3.1 Konstant Kraft i et Inertialsystem
 - 3.2 Cirkulær Bevægelse i et Inertialsystem
 - 3.3 Tyngde
- 4. Konklusion
- 5. Epilog

1. Indledning

Det er i dette år, 2007, **100 år** siden, Albert Einstein formulerede *Ækvivalensprincippet*. Senere beskrev han selv øjeblikket som

"happiest thought of my life"

, da det gik op for ham, at en observatør, der falder fra toppen af et hus, ikke kan mærke tyngdefeltet. Som en konsekvens formulerede han *Ækvivalensprincippet*:

... we shall therefore assume the complete physical equivalence of a gravitational field and the corresponding acceleration of the reference frame.

En dansk oversættelse lyder:

Ækvivalensprincippet

Et referencesystem, der bevæger sig med konstant acceleration i forhold til et inertialsystem, er lokalt set identisk med et referencesystem i hvile under påvirkning af et gravitationsfelt.

2. Definition og Fysikkens Ensartethed

2.1 En Mekanisk Kraft

Definition

En mekanisk kraft er en kraft, man kan måle med et Newtonmeter.

2.2 Fysikkens Ensartethed

Hvis to fysike eksperimenter giver samme resultat, kan den bagvedlæggende fysik beskrives ensartet for de to eksperimenter.

3. Tre Situationer

For at studere årsag og virkning af mekaniske kræfter, og dermed den bagvedlæggende fysik, vil jeg kigge på tre situationer, hvor en mekanisk kraft resulterer i acceleration af en masse:

- **Konstant Kraft i et Inertialsystem.** Jeg vil undersøge, hvordan en konstant kraft virker på en masse i et inertialsystem.
- **Cirkulær Bevægelse i et Inertialsystem.** Jeg vil undersøge, hvordan en kraft virker på en masse for at tvinge den ind i en cirkulær bevægelse i et inertialsystem.
- **Tyngde.** Jeg vil undersøge, hvordan begrebet, jeg vil kalde *tyngde*, er årsag til bevægelse nær et tungt objekt.

3.1 Konstant Kraft i et Inertialsystem

Vi har Newtons 2. lov:

$$\vec{F} = m\vec{a}$$
$$\Leftrightarrow \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Når jeg har sat acceleration for sig selv på den ene side er det fordi, at formlen nu har konsekvensen på venstresiden og årsagen til højre. Med andre ord:

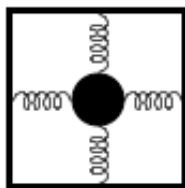
Newtons 2. lov

Når en masse, m , bliver påvirket af en mekanisk kraft, \vec{F} , opnår massen en acceleration, som beskrevet af Newtons 2. lov:

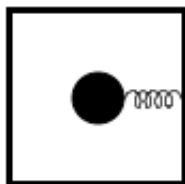
$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\vec{F}}{m}$$

3.1.1 Et eksperiment

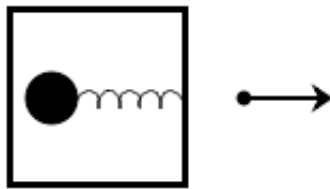
Vi forestiller os 2 observatører i et inertialsystem, hver med sit Newtonmeter i form af en kasse med en kugle ophængt i fjedre:



Faktisk behøver kuglen kun være ophængt i een fjeder, og observatøren kan så blot rotere kassen i retning af kraften. Så for at gøre eksperimentet lidt simplere forestiller vi os flg. udformning af kasserne:



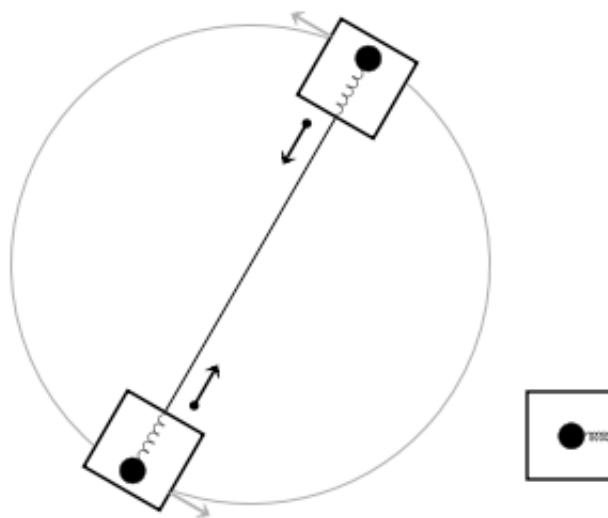
Hvis vi nu forestiller os, at den ene observatør bliver påvirket af en kraft, hvordan vil observatørerne så afgøre, om det er den ene eller den anden, der bliver påvirket af kraften? De kan begge se, at afstanden til den anden observatør vokser med kvadratet på tiden. Måden at afgøre det på er ved at kigge på hver deres kasse. Den observatør, der påvirkes af en kraft, vil se flg.:



Pilen angiver retningen på kraften. Man kan altså se, at kuglen bevæger sig væk fra centrum, og at fjederen peger i samme retning som kraften. Så længe observatøren påvirkes af en resulterende kraft, vil kuglen være i en position væk fra centrum.

3.2 Cirkulær Bevægelse i et Inertialsystem

Jeg vil nu se på cirkulær bevægelse i et inertialsystem. Igen har vi en observatør, der denne gang slynges rundt i en cirkelbevægelse samt en observatør, der er i hvile i inertialsystemet (eller bevæger sig med jævn hastighed). For at skabe ligevægt i cirkelbevægelsen, benytter jeg 2 roterende kasser, een i hver ende af et tov:



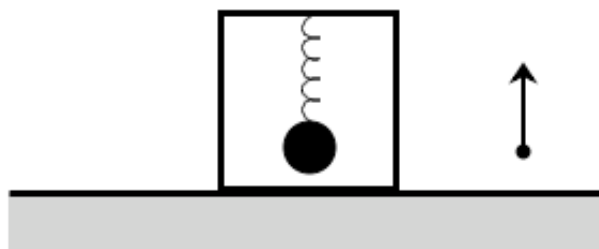
(De grå pile angiver, at systemet roterer med jævn fart.)

Den resulterende kraft for hver kasse i cirkelbevægelsen er **centripetalkraften**, som peger ind mod centrum. Vi ser, at eksperimentet passer godt med forrige eksperiment, som undersøgte bevægelse i en retning med konstant kraft (og konstant acceleration) i et inertialsystem. Kuglerne i de accelererede kasser har en position væk fra centrum, og fjederen peger i kraftens retning, nemlig ind mod centrum.

Der er ikke nogen kraft udad i cirkelbevægelsen. Den såkaldte **centrifugalkraft** er en fiktiv kraft!

3.3 Tyngde

Lad os nu se på en kasse, der står stille på Jordens overflade. Hvad vil man se? Man ser flg.:

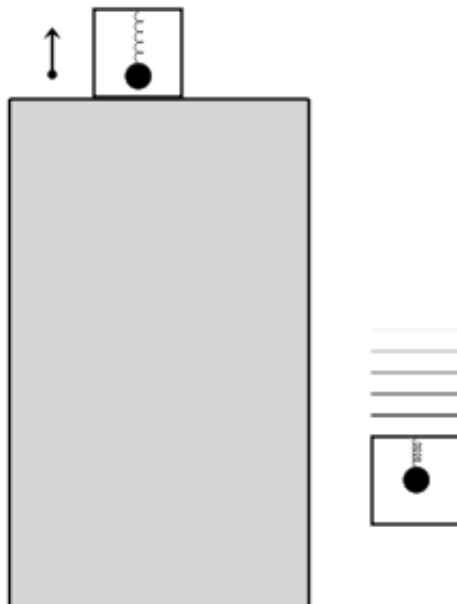


Man kan sige 2 ting:

1. Kuglen befinder sig ikke i centrum, så kassen er altså påvirket af en resulterende kraft!
2. Den resulterende kraft peger i fjederens retning, hvilket er op!

Jamen kassen står jo stille! (, vil nogen sige.)

Stille i forhold til hvad? I de andre eksperimenter var det i forhold til en observatør, der ikke var påvirket af en resulterende kraft. Hvordan opnår man det, når der er tyngde til stede? Lad os forestille os, at de 2 observatører befinder sig i toppen af et tårn, og at den ene springer ud:



Nu ser man, at den faldende observatør IKKE er påvirket af en resulterende kraft! (Kuglen i hans kasse befinder sig jo i centrum af kassen.) Samtidig ser man, at observatøren i toppen af tårnet ER påvirket af en resulterende kraft, og at retningen på denne kraft er op!

Nu er forklaringen til eksperimentet i overensstemmelse med det første eksperiment.

Jamen er dette ikke i strid med Newtons Mekanik? Tjo, det er en revision af Newtons Mekanik, og det var netop dette, Einstein indså med sit *ækvivalensprincip*.

Newton beskrev tyngdekraften med formlen:

$$\vec{F}_g = m \frac{d\vec{v}}{dt} = -G \frac{mM}{r^2} \hat{r}$$

Problemet med denne formel er, at den ikke er reduceret, og derfor ikke giver den **rigtige fysiske mening**. Flg. formel er reduceret:

$$\vec{g} = \frac{d\vec{v}}{dt} = -G \frac{M}{r^2} \hat{r}$$

Som med Newtons 2. lov har vi nu årsag og virkning.

Gravitationel acceleration

Et objekt, der befinder sig i afstanden, r , fra en stor masse, M , opnår en acceleration, som beskrevet af formlen for gravitationel acceleration:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -G \frac{M}{r^2} \hat{r}$$

4. Konklusion

Tyngdekraft er en fiktiv kraft på lige fod med centrifugalkraften!

Tyngdeacceleration er virkelig! Man kan altså i mekanikken opnå acceleration på 2 måder:

1. Hvis man bliver påvirket af en resulterende kraft, opnår man en acceleration som beskrevet af Newtons 2. lov.
2. Hvis man befinder sig i afstanden, r , fra en masse, M , opnår man en acceleration som beskrevet af formlen for tyngdeacceleration.

Pointen er, at i situation 2 er der ingen kraft på spil! Jeg er ret sikker på, at Einstein indså dette, så det er ikke nyt, det jeg skriver her. Det jeg gør, er at tage konsekvensen i Newtons Mekanik.

Når vi går rundt her på Jorden, er vi påvirket af en resulterende kraft i opadgående retning. Denne kraft påtrykkes os af underlaget under vores fødder. Det er altså en frastødende kraft mellem underlaget og vores fodsåler, også kaldet *Normalkraften*. Denne kraft skaber en acceleration opad, som er lige så stor og modsat rettet tyngdeaccelerationen nedad. Tyngdeaccelerationen nedad er ikke forårsaget af en kraft, men er simpelthen en konsekvens af, at vi er i nærheden af den store masse, som Jorden udgør.

Objekter i frit fald i et tyngdefelt (hvilket er et accelerationsfelt, og ikke et kraftfelt) er at betragte som værende i et inertialsystem.

Jeg finder det meget sandsynligt, at man aldrig finder *gravitonen*. Tyngde er nemlig ikke en kraft med tilhørende kraftpartikel. Tyngde er noget rent geometrisk, som beskrevet af Einsteins Generelle Relativitetsteori.

5. Epilog

Hvis man konsekvent indfører ækvivalensprincippet i Newtons Mekanik, bliver mange opgaver og situationer som beskrevet i lærebøgerne enklere og nemmere at forstå, fordi man kan undlade en kraftpil. F.eks. kan nævnes *det roterende pendul* og forklaringen omkring en gasballon bundet fast til gulvet i en togvogn, som påvirkes af en kraft i vandret retning. (Disse og mange andre opgaver findes i J.M.Knudsens "Newtonian Mechanics".)

I visse tilfælde giver Newtons Mekanik og Einsteins Generelle Relativitetsteori forskellige målelige resultater. Hvis tyngde er en kraft med tilhørende kraftpartikel, så vil en teori bygget på denne opfattelse skulle give de samme resultater som den Generelle Relativitetsteori. F.eks. kan nævnes:

- Ændringen af Merkurs bane om Solen er større end beskrevet af Newtons Mekanik. Den Generelle Relativitetsteori giver det rigtige resultat.
- Afbøjning af lys omkring en masse er dobbelt så stor som forudsagt af Newtons Mekanik. Den Generelle Relativitetsteori giver det rigtige resultat.