

AST2000 Del 1F

Interaktive forelesningsnotater

VIKTIG

Dette er et alternativ til forelesningen i emnet. Har du gått skikkelig gjennom disse interaktive forelesningsnotatene så trenger du ikke å lese de fulle forelesningsnotatene (med unntak av oppgavene bak). All informasjonen du trenger, får du her. Du kommer til å få mange grublespørsmål og diskusjonsoppgaver, det er meningen at disse skal gjøres i grupper av minst 2, maks 4 studenter. **Det er derfor sterkt anbefalt at dere sitter sammen i grupper når dere går gjennom disse interaktive forelesningsnotatene, du vil få betydelig mer utbytte av dem på den måten.** Hvis du har kommentarer ris/ros til disse forelesningsnotatene eller til emnet, trykk på 😊 😞 knappen som du finner på alle sider.

Trykk denne knappen for å begynne

- HUSK at du får mer ut av de interaktive forelesningsnotatene når du gjør de sammen med noen. Diskusjonene med andre er svært viktige.
- Det er mange spørsmål/grubliser underveis, sett dere selv en tidsgrense, 1 minutt på de korte, maks 4-5 minutter på de lenger. Ha en alarm ved siden av, ellers kommer dere til å bruke alt for langt tid. Har dere ikke fått det til etter kort tid, gå videre, se svaret og lær!
- Er du i det minste tvil om noe, så finnes det en **FORUM** knapp, trykk det og still spørsmål med en gang mens du enda husker spørsmålet!

Trykk denne knappen for å begynne


Forrige side

Hvis du allerede har begynt på denne forelesningen og vil hoppe rett inn til et annet kapittel, kan du trykke her:

- Elementærpartikler
- Galaktiske rotasjonskurver
- Mørk materie
- Modellering av mørk materie-haloer
- Hva er mørk materie?

Neste side

Forrige side



Velkommen til del 1F! Her skal vi ta en gjennomgang av alle de kjente elementærpartiklene som bygger opp universet vårt og så skal vi spekulere litt i om det finnes noen ukjente. Vi skal se på 'mørk materie'-begrepet, hvor det kommer fra, hva som gjør at vi trenger det og hva slags materie det kan være snakk om. Dette forelesningsnotatet tilsvarer omkring en dobbelttime fysisk forelesning. Er du klar?

Neste side

[Forrige side](#)



side 1 av 42

[Introduksjon](#)

[FORUM](#)

Vi begynner som vanlig...

...med litt brainstorming. Som det er **svært viktig** at du gjør før du går videre.

[Trykk her for å varme opp](#)

Er du klar og har sendt inn skjemaet?

Nei

Ja

Forrige side

Nytt tema:

Elementærpartikler

Dette temaet fortsetter frem til side 12 av 42.

Opplys meg! (om den mørke materien)



Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z ⁰ Z boson
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W [±] W boson

Quarks

Leptons

Gauge Bosons

I oversikten over ser du alle kjente elementærpartikler i den såkalte **standardmodellen** i partikkelfysikk untatt den såkalte Higgspartikkelen.

Før du går videre bør du nå gå inn i de vanlige **forelesningsnotatene** for del 1F og lese avsnitt 1 “Some particle physics”. Det har ikke meningen at alt dette blir repetert her, så bedre at du leser denne godt. På de neste sidene skal du bli testet i det du har lest. **Prøv å pugge dette stoffet nå slik at du klarer å ta testen uten å slå opp!** Dette har dukket opp flere ganger på eksamen og i prosjektet kan du få bruk for å beskrive dette med egne ord. Har du pugget dette en gang vil det sitte mye forttere neste gang.

Neste side



Kun et av disse utsagnene er riktig, trykk på det riktige!

protoner er bosoner

fotoner er fermioner

Higgspartikkelen er et fermion

nøytronet er et boson

nøytrinoet er et fermion

gravitonet er et fermion

[Forrige side](#)



side 5 av 42

[Elementærpartikler](#)

[FORUM](#)

Det var feil! Sjekk at du har kontroll på forskjellen mellom fermioner og bosoner, og hvilke partikler som tilhører hver gruppe. Det letteste er å lære hvilke partikler som er kraft-overførende, de pluss Higgspartikkelen er de eneste bosonene blant elementærpartiklene

Forrige side



side 5 av 42

Elementærpartikler

FORUM

Flott, bra jobba!

Neste side



Kun et av disse utsagnene er riktig, trykk på det riktige!

nøytroner er mesoner

protoner er leptoner

nøytrinoer er hadroner

kvarker er baryoner

protoner er mesoner

nøytroner er hadroner

[Forrige side](#)[side 7 av 42](#)[Elementærpartikler](#)[FORUM](#)

Det var feil! Sjekk at du har kontroll på forskjellen mellom leptoner og hadroner på den ene siden, og hadronene som deles opp i mesoner og baryoner på den andre. Du må også vite hvor mange kvarker protoner og nøytronene består av og dermed hva slags type partikler disse er.

[Forrige side](#)



side 7 av 42

[Elementærpartikler](#)

[FORUM](#)

Flott, bra jobba!

[Neste side](#)



Kun et av disse utsagnene er riktig, trykk på det riktige!

protoner har leptonnummer $+1$

elektronnøytrinoet har elektrisk ladning -1

oppkvarken har elektrisk ladning $+1$

nedkvarken har leptonnummer $+1$

fotoner kan ha spinn $+1$

positronet(antipartikkelen til elektronet) har el. ladning -1

[Forrige side](#)[side 9 av 42](#)[Elementærpartikler](#)[FORUM](#)

Det var feil! Sjekk at du har kontroll på leptonnummer, spinn og elektrisk ladning. Det er ikke forventet at du skal huske nøyaktig elektrisk ladning til alle kvarkene, men vite at ladningene er i $1/3$ -deler eller $2/3$ -deler.

Forrige side



side 9 av 42

Elementærpartikler

FORUM

Flott, bra jobba!

Merk at du er forventet å ha kontroll på leptonnummer, spinn og elektrisk ladning. Det er ikke forventet at du skal huske nøyaktig elektrisk ladning til alle kvarkene, men vite at ladningene er i $1/3$ -deler eller $2/3$ -deler.

Neste side

[Forrige side](#)



[side 10 av 42](#)

[Elementærpartikler](#)

[FORUM](#)

Ta nå frem et papir, skriv ned de 4 grunnleggende kreftene vi har i naturen samt bosonene som hører til hver kraft.

Jeg har skrevet det ned og er klar til å gå videre!

Forrige side



side 11 av 42

Elementærpartikler

FORUM

Fikk du det riktig? Hvis ikke, ta en runde til med repetisjon om elementærpartikler så det sitter skikkelig!

Neste side

Forrige side

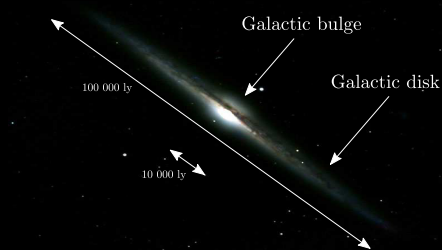
Nytt tema:

Galaktiske rotasjonskurver

Dette temaet fortsetter frem til side 25 av 42.

Sett igang!

Før vi skal se på galaktiske rotasjonskurver (hva nå enn det er ...) så skal vi se hvordan en typisk galakse ser ut. Vi skal nærmere bestemt se på en spiralgalakse slik som vår egen Melkevei som et eksempel:



Dimensjonene som er tegnet inn gjelder for Melkeveien som er en typisk spiralgalakse. Den består av en **rund tynn skive** (~ 1000 lysår tykkelse) med stjerner som vi kaller **galakseskiven**. Den er omkring 100.000 - 200.000 lysår i diameter. I sentrum er det en kuleformet ansamling av stjerner som kalles **galakseutbulingen** med diameter omkring 10.000 lysår. Stjernene går i bane i galakseplanet omkring det supermassive sorte hullet i sentrum av galaksen. Det er noen hundre milliarder stjerner i Melkeveien og stjernetettheten i en typisk galakse faller kraftig av med avstand r fra sentrum som $\rho_{\text{star}}(r) \propto r^{-3.5}$.



Tilbake til spørsmålet på skjemaet.

Under ser du en galakse:



Det er ikke helt urimelig å anta at alle stjernene i denne spiralgalaksen befinner seg i det samme planet, galakseplanet, og at de går i bane rundt det sorte hullet i sentrum.

Anta videre at **alle stjerner går i sirkelbaner** som alle ligger i **dette galakseplanet**. Vi antar altså at all materie i galaksen ligger i en tynn skive.

Vi skal ta for oss en stjerne i avstand r fra sentrum av galaksen. Hva blir gravitasjonskraften på denne stjerna fra resten av galaksen?

[Trykk her når du har forslag!](#)



Tilbake til spørsmålet på skjemaet.

Under ser du en galakse:



Det er ikke helt urimelig å anta at alle stjernene i denne spiralgalaksen befinner seg i det samme planet, galakseplanet, og at de går i bane rundt det sorte hullet i sentrum. Anta videre at **alle stjerner går i sirkelbaner** som alle ligger i **dette galakseplanet**. Vi antar altså at all materie i galaksen ligger i en tynn skive.

Vi skal ta for oss en stjerne i avstand r fra sentrum av galaksen. Hva blir gravitasjonskraften på denne stjerna fra resten av galaksen?

Trykk her når du har forslag!

Husker du fra utledningen av likningen for hydrostatisk likevekt? Gravitasjonskreftene fra et kulesymmetrisk skall er 0 innenfor skallet. Det samme gjelder i 2 dimensjoner, altså for en skive, så lenge objektet vi ser på beveger seg kun i skiven. **Vi får altså ingen tyngdekraft fra stjernene på utsiden av radius r .**

Neste side



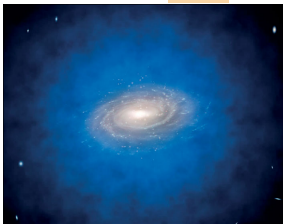
Helt på samme måte, så får vi vanlig Newtonsk gravitasjonskraft

$$F = G \frac{M(r)m}{r^2}$$

hvor igjen $M(r)$ er den totale massen til galaksen på innsiden av radius r og m er massen til stjerna vi ser på. Dermed har vi for denne stjerna tilnærmet det klassiske 2-legeme-problemet, hvor massen på legemene er $M(r)$ og m .

Da vet vi at resultatet gir oss Keplers lover, **MEN** de må anvendes individuelt for hver avstand r fra sentrum. **Jo lenger utover i galaksen du kommer, jo større blir massen $M(r)$.** Dette er en stor forskjell fra planetsystemer der massen M av stjerna er den samme for alle planeter. I tillegg vil stjernene nær sentrum kunne være sterkt påvirket av andre objekter i nærheten.

Neste side



Men hvis vi nå ser på de få stjernene som befinner seg helt i utkanten av galaksen, så er situasjonen en annen.

Her er det få stjerner og totalmassen innenfor r endrer seg svært lite ettersom vi går videre utover fra galaksen (r øker videre). For stjernene i utkanten av galaksen så vil massen $M(r) = M$ der M er massen til hele galaksen være en svært god tilnærming.

Da kommer vi til et annet spørsmål fra skjemaet. **Hvilken banehastighet har disse stjernene??** Husk at vi antar sirkelbaner, og husk at tyngdekrafta er den vanlige Newtonske med en masse M (hele galaksens masse) i sentrum. Hva må den bli?

Trykk her når du har forslag!



Men hvis vi nå ser på de få stjernene som befinner seg helt i utkanten av galaksen, så er situasjonen en annen.

Her er det få stjerner og totalmassen innenfor r endrer seg svært lite ettersom vi går videre utover fra galaksen (r øker videre). For stjernene i utkanten av galaksen så vil massen $M(r) = M$ der M er massen til hele galaksen være en svært god tilnærming.

Da kommer vi til et annet spørsmål fra skjemaet. **Hvilken banehastighet har disse stjernene??** Husk at vi antar sirkelbaner, og husk at tyngdekrafta er den vanlige Newtonske med en masse M (hele galaksens masse) i sentrum. Hva må den bli?

Trykk her når du har forslag!

Ganske riktig ja, da kan vi bruke god gammeldags *sentripetalakselerasjon* som gir

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

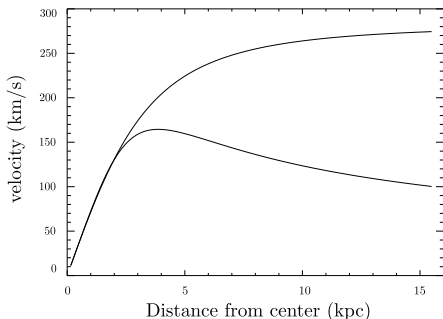
for alle stjerner i de ytre delene av galaksen.

Neste side



Hvis vi nå observerer stjerne hastigheter på forskjellige avstander r fra sentrum, der r er så stor at vi er sikker på at nesten hele galaksens masse er innenfor (i de ytterste delene er det svært få stjerner som kan bidra til totalmassen), så skulle vi for disse få en kurve som følger modellen

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad \text{for } r \text{ stor nok}$$



I figuren til venstre ser du denne modellen tegnet inn (nederste kurve).

Den øverste kurven derimot, er typisk for faktiske observasjoner av stjerne hastigheter!

Helt forskjellig fra den teoretiske modellen! Vi ser at den faktiske kurven er nesten flat og ikke følger en $\sqrt{1/r}$ modell.

Neste side



Hva kan forårsake et så stort avvik mellom teori og observasjon?

Det er helt klart at noe er galt med modellen, men hva? Hvilken antakelse har gått galt?

Før du går videre: Tenk gjennom alle antakelser vi har gjorde da vi kom frem til det teoretiske uttrykket. Hvilken tror du kan være gal og som kan gi oss en slik feil?

Jeg har gått gjennom alle antakelsene og tenkt



I modellen vår

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad \text{for } r \text{ stor nok}$$

så avtar hastigheten med $\sqrt{1/r}$ fordi stjernene kommer lenger og lenger unna massesenteret til galaksen. Siden M ikke øker (nevneverdig) så må gravitasjonskrafta avta med avstanden! Dermed blir hastigheten lavere med r (Keplers 2. lov). **Men observasjonene viser altså at hastigheten ikke avtar med avstanden.** Tyngdekraftene på stjernene lenger ut må dermed være større enn vi trodde. **Hvis vi ser på Newtons tyngdelov så er det kun massen M som her evt. kan øke slik at tyngdekraften blir større og vi dermed får større sentripetalakselerasjon!** Hvis

totalmassen $M(r)$ innenfor en radius r øker kraftig med r også i de ytre delene av galaksen så kan dette forklare at den observerte **rotasjonskurven** (lær til dette order, det brukes mye: stjernehastighet som funksjon av avstand r fra galaksesenter) ikke stemmer overens med den teoretiske. **MEN** det er bare det at vi ikke ser noen stjerner eller annen form for synlig materie i ytterkantene som kan forklare at $M(r)$ skal

øke. Neste side

Forrige side

Hang du med nå eller?

Hvis ikke,

gå en side eller to tilbake til du er helt sikker på at du forstår!

Jeg henger godt med!



Det er her hypotesen om **mørk materie** kommer inn. For at $M(r)$ skal kunne øke nevneverdig med r i de ytre delene av galaksen, så må det finnes materie der som ikke er synlig, som ikke avgir lys, derav **mørk materie**. Du kan se det hele animert [her](#), hvor du ser en galakse roterer med og uten mørk materie (se rotasjonskurvene under galaksen). Legg merke til stjerne hastigheten ytterst!

Forrige side

Kaffe??? Yes!!



Dette var mørkt stoff, og mørkere skal det bli! Dermed trenger du en tur ut i dagslys nå!! Ihvertfall 10 min...

Har klarnet tankene nå!

Forrige side

Nytt tema:

Mørk materie

Dette temaet fortsetter frem til side 34 av 42.

Endelig kom vi til saken her!



Skulle du ha bittelitt tid til overs og lyst til å se en repetisjon av hva vi akkurat snakket om, med litt andre ord og med litt info om hvordan målinger gjøres for å måle rotasjonskurven til Melkeveien, ta en titt på [denne 3 minutters Youtube-videoen.](#)



Vi begynner med å kikke på en av ukeoppgavene:

Exercise 1F.1

Two galaxies with similar sizes orbit a common center of mass. Their distance from us has been estimated to 220 Mpc (one parsec=3.26 light years, 1 Mpc= 10^6 parsecs). Their angular separation on the sky has been measured to $3.1'$. Their velocity with respect to the center of mass has been estimated to $v = 100$ km/s for both galaxies, one approaching us the other receding. Assume circular orbits. Assume that the velocities of the galaxies only have a radial component such that the given velocity is the full velocity of the galaxies.

1. What is the mass of the galaxies? (**Hint:** here you need to go back to the two-body problem. First calculate the radius of the orbit and then use equations from the lectures on celestial mechanics. You will need to play a little with the equations.)

Finner du massen til galaksene? Kikk deretter på deloppgave 2:

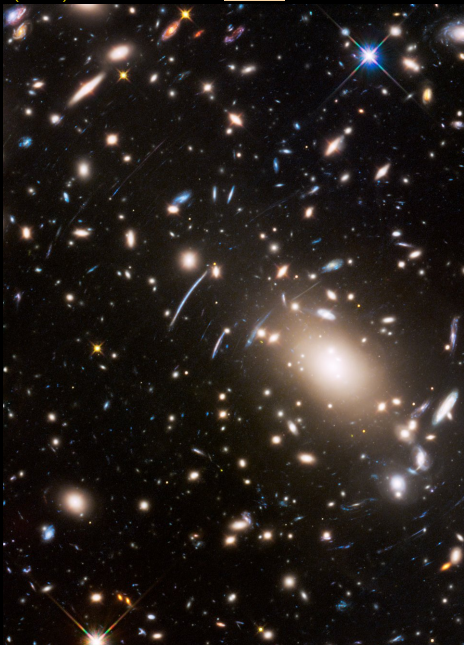
2. The size of the galaxies indicate that they contain roughly the same number of stars as the Milky Way, about 2×10^{11} . The average mass of a star in these two galaxies equals the mass of the Sun. What is the total mass of one of the galaxies counting only the mass of the stars?

Gjør du dette riktig så skal du få omkring 9×10^{11} solmasser i deloppgave 1 når du kun beregner massen fra kun fra gravitasjonskraften mens du får 2×10^{11} solmasser når du bruker den synlige massen. Hvis du er usikker på hvordan disse oppgavene løses, ta en kikk på [denne videoen](#). **MERK feil i videoen: det er 1.9×10^{17} sekunder ikke år! Men slutt-resultatet blir riktig!** Neste side



Hva betyr dette? Du fant en mye større masse til 2-galaksesystemet hvis du brukte tyngdekraften til å måle massen enn hvis du telte massen til de synlige stjernene. Igjen så er dette et typisk resultat. Når man ser på galakseres bevegelse omkring hverandre i en galaksehopp så finner man samme resultat som når vi ser på rotasjonskurven til enkeltgalakser!

Husker du forresten hva en galaksehopp er??? Det er noen 100 eller noen 1000 galakser som går i bane omkring et felles massesenter. Dette er de største strukturene i universet.



Man har også en helt uavhengig måte å måle massen til en galaksehopp på ved å se på lysavbøyning av lys fra meget fjerne objekter som ligger langt bak galaksehopen. I bildet her er prikkene galakser i en galaksehopp mens buene er det avbøyde lyset fra fjerne objekter. Lyset fra det fjerne objektet passerer gjennom hopen, men blir avbøyd på grunn av tyngdekrafta i galaksehoppa. Ved å se på avbøyninga til lyset kan man 'veie' galaksehoppa og på den måten finne massen til hoppa. Denne typen målinger bekrefter det som man finner ved andre metoder: **Akkurat som enkeltgalaksene så inneholder også galaksehoppene mye mer masse enn**

Forrige side



side 28 av 42

Mørk materie

FORUM

Observasjoner av galakser og galaksehoper viser at omkring 85% av massen i universet er mørk materie.

Men hva er nå denne mørke materien???

Kan det være døde stjerner/planeter, andre mørke objekter??

Observasjoner av den kosmiske bakgrunnsstrålingen viser at den mørke materien mest sannsynlig ikke består av partikler fra standardmodellen men sannsynligvis er nye og ukjente partikler utenfor standardmodellen for partikkelfysikk. Partikler som aldri eller svært sjeldent reagerer med de kjente partiklene på noen annen måte enn gjennom gravitasjon!

Neste side



- Størrelsen på fluktuasjonene i den kosmiske bakgrunnsstrålingen bekrefter at det trengs omkring 85% mørk materie for å danne de strukturene vi idag ser i universet.
- Samtidig så setter nukleosyntesen, perioden i universets tidlige historie da de første atomkjernene ble dannet, en grense for hvor mye 'vanlig materie' som kan eksistere. Hvis det hadde eksistert betydelig mer vanlig materie (som reagerer med partikler i standardmodellen gjennom andre krefter enn gravitasjon), så hadde vi hatt en helt annen sammensetning av grunnstoffer i universet idag.
- Dette forteller oss at den mørke materien må bestå av partikler som reagerer svært svakt med andre partikler, unntatt gjennom gravitasjon da vi jo 'ser' den mørke materien gjennom gravitasjonspåvirkning av andre legemer. Hvis en partikkel skal sende ut/absorbere fotoner, må den kunne virke med elektromagnetiske krefter, gjør den ikke det, så blir den 'mørk'. I standardmodellen har vi kun en slik partikkel som virker svært svakt gjennom andre krefter enn gravitasjon: nøytrinoet. Kan mørk materie være nøytrinoer???



Mørk materie kan kategoriseres bl.a. som:

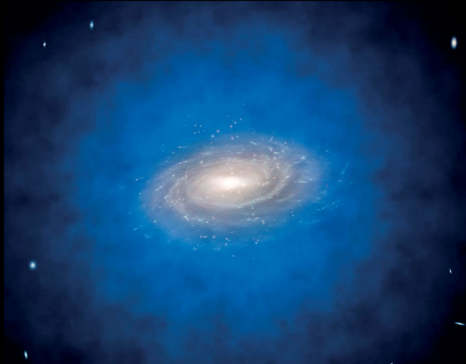
- **Varm mørk materie (Warm Dark Matter WDM):** Dette er lette mørk materiepartikler med hastigheter nær lyshastigheten. Denne typen partikler vil oppføre seg tilnærmet som lys pga. sin høye hastighet. Nettopp nøytrinoer er en slik mulig WDM-kandidat.
- **Kald mørk materie (Cold Dark Matter CDM):** Dette er tyngre partikler med lavere hastigheter og vil dermed oppføre seg mer som bl.a. protoner, elektroner og atomkjerner, bortsett fra at de da svært sjelden/ikke på noen måte reagerer med disse eller andre partikler i standardmodellen.

...og så finnes selvfølgelig mellomtingen LWDM (Luke Warm Dark Matter). Men hvordan kan vi skille mellom disse to teoriene? Gitt at de kun vekselvirker med gravitasjon og i svært liten/ingen grad med de andre fundamentale kreftene, hvordan kan vi gjennom observasjoner avgjøre f.eks. om vi har WDM eller CDM? Tenk deg godt om før du blar om! Neste side

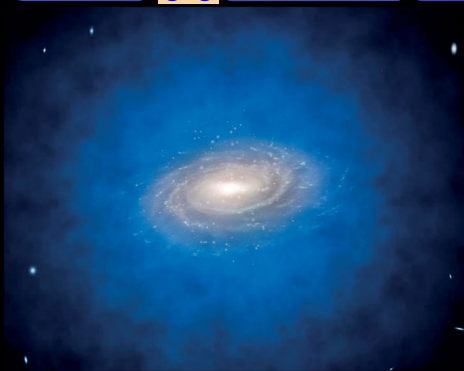


Kunne man f.eks. bruke observasjonene vi har av galaktiske rotasjonskurver? Eller observasjonene av galaksenes hastighet i galaksehoper? **Isåfall, på hvilken måte ville disse observasjonene være forskjellige avhengig av typen mørk materie?**

Diskuter og se om dere får noen ideer før du går videre til ... [... neste side](#)



På bildet av galaksen ser du også en blå 'sky' inntegnet. Denne illustrerer hvordan den mørke materien har klumpet seg rundt galaksen. Ved å kartlegge fordelingen av mørk materie i en galakse har man funnet ut at den mørke materien ligger i det vi kaller en **halo** omkring galaksen. Det er en tilnærmet kulesymmetrisk sky av mørk materie med radius som er flere ganger større enn radiusen til galaksen som man finner ved å observere fordelingen av stjerner og gass. Den synlige delen av galaksen ligger i sentrum av denne haloen.



Vil ikke tetthet og tetthetsvariasjoner av mørk materie i en slik halo være forskjellig avhengig av hvilken type mørk materie man har? Hvordan tror du WDM med partikler nær lyshastighet ville klumpet seg slik? Hvis vi nå kan lage en modell av tetthet av mørk materie som funksjon av r , altså $\rho(r)$, utifra hastighetsmålingene vi har i galaksen, så vil det være et viktig redskap i å kunne forstå hva slags mørk materie vi har ved å se hvordan den mørke materien kan klumpe seg ifølge modellen $\rho(r)$ vi finner.

Det skal vi se litt på nå...

Forrige side

Nytt tema:

Modellering av mørk materie-haloer

Dette temaet fortsetter frem til side 41 av 42.

La oss gjøre litt utledning igjen...



Vi ønsker altså å finne et uttrykk for $\rho(r)$ utifra hastighetsfunksjonen $v(r)$. Vi antar altså kulesymmetri siden tettheten kun er en funksjon av r . Dette er rimelig siden vi har observert at den mørke materien ligger i en kulesymmetrisk halo og ikke i en skive slik som den vanlige materien gjør i en spiralgalakse. Den mørke materien dominerer, så det er en god antakelse og kun se på den mørke materien her. Tettheten i avstanden r fra sentrum av galaksen er vel egentlig:

$$\rho(r) = \frac{\text{masse av infinitesimalt kuleskall}}{\text{volum av infinitesimalt kuleskall}} = \frac{dM}{4\pi r^2 dr} = \frac{1}{4\pi r^2} \frac{dM}{dr}$$

der vi altså ser på et infinitesimalt kuleskall omkring sentrum av galaksen i avstand r med tykkelse dr . Massen til kuleskallet betegner vi dM og tykkelsen dr . Kan du set at dM/dr her egentlig er den deriverte av funksjonen $M(r)$ som var den totale massen innenfor en radius r ? Altså at

$$\frac{dM}{dr} = \frac{dM(r)}{dr}$$

Ja, det ser jeg!

Bli det sånn da?



Det er vel sann at massen dM av det tynne kuleskallet må være forskjellen mellom massen $M(r + dr)$ og massen $M(r)$? Dermed har vi vel altså at $dM = M(r + r) - M(r)$ og fra definisjonen av derivert har vi da at

$$\frac{dM}{dr} = \frac{dM(r)}{dr}$$

Vi fant for en del sider siden en sammenheng mellom observert hastighet $v(r)$ og total masse $M(r)$ på innsiden av r ved hjelp av sentripetalakselerasjon. Stokker vi om på det uttrykket får vi

$$M(r) = \frac{1}{G} v^2(r) r$$

Vi trengte dM/dr for å finne tettheten, så da deriverer vi iveri med produktregel og kjerneregel:

$$\frac{dM(r)}{dr} = \frac{1}{G} \left(2v(r)r \frac{dv}{dr} + v^2(r) \right)$$

Insatt i uttrykket for $\rho(r)$ fra forrige side så har vi da:

$$\rho(r) = \frac{1}{4\pi r^2} \frac{dM}{dr} = \frac{1}{4\pi r^2 G} \left(2v(r)r \frac{dv}{dr} + v^2(r) \right)$$

Enig? Hvis du er usikker på det vi har gjort så langt, spør foreleser!



Vi fikk:

$$\rho(r) = \frac{1}{4\pi r^2 G} \left(2v(r)r \frac{dv}{dr} + v^2(r) \right)$$

Ser du at hvis du nå har observert stjerne hastighet i en avstand r og dermed fått observert funksjonen $v(r)$, så kan du nå finne tetthetsprofil $\rho(r)$ av mørk materie (pluss lysende, vi ser jo på total masse, men den mørke dominerer) i galaksen? Du trenger kun å sette inn observert hastighet som funksjon av r samt den deriverte av denne.

Nå så vi jo at $v(r)$ blir nesten flat i ytre deler av galaksen. Dermed blir den deriverte av hastigheten 0 i disse delene av galaksen og vi får:

$$\rho(r) = \frac{v^2(r)}{4\pi r^2 G}$$

som er enklere å regne med. **I oppgavene i dette kurset skal du bruke dette uttrykket også i de sentrale delene selv om det blir veldig omtrentlig.**



Vi har for de ytre delene av galaksen at

$$\rho(r) = \frac{v^2(r)}{4\pi Gr^2}$$

Ser du at tettheten faller som $\rho(r) \propto 1/r^2$ her? (husk at $v(r)$ er tilnærmet en konstant i disse delene av galaksen) Tettheten av stjerner i en galakse faller omtrent som $\rho_{\text{star}}(r) \propto 1/r^{3.5}$, altså mye raskere enn den mørke materien. **Det forklarer resultatet vårt fra tidligere: fordelingen av mørk materie er mye mer utbredt enn fordelingen av lysende materie!** Det er fortsatt mye mørk materie igjen i de ytre delene av den synlige delen av galaksen. Dermed øker $M(r)$ enda kraftig når man går videre utover og det ble feil å anta at M var en konstant størrelse.

Men hva skjer med tettheten i sentrum utifra dette uttrykket? Divergerer det ikke? Observasjoner viser at hastigheten $v(r)$ er omtrent proporsjonal med r i sentrale deler, altså $v(r) \propto r$. Da gir formelen oss at tettheten i sentrum er tilnærmet konstant. (ser du det?)



Ved å bruke denne metoden samt bl.a. gravitasjonslensing som vi snakket om tidligere har man kommet frem til en generell tetthetsprofil som passer for de fleste galakser:

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + (r/R)^2}$$

der ρ_0 og R er konstante størrelser som varierer fra galakse til galakse, Disse størrelsene må man tilpasse fra dataene for en gitt galakse, dette skal du få prøve i ukeoppgavene. Men kan du gi en tolkning av ρ_0 og R ? Lek litt med uttrykket og se om du finner hva ρ_0 og R egentlig betyr...

Når du har en ide om hva ρ_0 og R er, trykk her



Hvis du ikke fikk det helt til, et par hint:

- Kan du finne en verdi for r , altså en avstand fra sentrum av galaksen som gir en enkel sammenheng mellom $\rho(r)$ og ρ_0 ? Dette skulle gi deg tolkningen av ρ_0
- Det kan virke som R er en eller annen avstand, spesielt når vi ser hva slags enheter den må ha. Hva er $\rho(r)$ når avstanden $r = R$? Fant du en tolkning av avstanden R ?

Når du har en ide om hva ρ_0 og R er, trykk her



Ser du at

- ρ_0 er tettheten i sentrum?
- R er avstanden fra sentrum der tettheten har falt til halvparten av tettheten i sentrum?

Hvis du ikke ser det, spør foreleser! Ser du dermed at når $r \rightarrow 0$ så går ρ mot den konstante tettheten ρ_0 ? Og når r blir veldig stor så får vi tilbake $\rho(r) \propto 1/r^2$ som vi fant over? Men hva betyr nå disse resultatene for forståelsen av hva den mørke materien er??

Forrige side

Nytt tema:

Hva er mørk materie?

Siste tema i denne forelesningen!

Og svaret er ...

[Forrige side](#)



side 41 av 42

Hva er mørk materie?

[FORUM](#)

Ingen vet!!!

Men det finnes mange teorier.

[Neste side](#)



Vi nevnte tidligere at det finnes en partikkel i standardmodellen som kunne passe som mørkt materie: **nøytrinoene vekselvirker veldig svakt med annen materie på annen måte enn gjennom gravitasjon.** Men nøytrinoene er lette og ville dermed ha høy hastighet og være WDM. Alle tester så langt, og da blant annet av klumpingen til den mørke materien slik som vi akkurat diskuterte, viser at **mørk materie mest sannsynlig er CDM**, kald mørk materie. Ofte kjører man store partikkelsimuleringer (alla den du gjorde med partikkel i boks, men med en stor andel av universet) og ser hvordan forskjellige typer simulert mørk materie klumper seg og sammenlikner med profilen til f.eks. en galakse slik som vi akkurat utledet. På den måten kan vi teste forskjellige typer teorien. **Men hvis nøytrinoene er den eneste partikkelen i standardmodellen i partikkelfysikk som kunne passe, men som da ikke passer likevel...**

...så betyr det at...



...**mørk materie må være en ny og enda ukjent partikkel.** En partikkel som enda ikke er en del av standardmodellen. Teoretisk partikkelfysikk har i mange tiår allerede forutsagt eksistensen av mange forskjellige typer slike partikler ved å se på symmetrier i de matematiske teoriene. En av de mange mulige teoretiske utvideleser av standardmodellen er den såkalte **supersymmetriske modellen**. I den modellen har ethvert fermion en supersymmetrisk partnerpartikkel som er et boson, og hvert boson en supersymmetrisk partnerpartikkel som er et fermion (litt på samme måte som alle partikler har en antipartikkel med motsatt ladning og leptonnummer). Partneren til protonet ville vært et **sproton**, partneren til elektronet et **selektron** og parteneren til fotonet et **fotino**. Selv om denne teorien har eksistert i veldig lang tid, så har man så langt **ikke lykkes i å bekrefte at disse partiklene faktisk eksisterer. Men hvis de eksisterer så er mange av disse forutsagt å ha de egenskapene som vi ser at CDM har.** I tillegg til supersymmetri finnes det også en rekke andre teorier som forutsier utvidelser av standardmodellen med partikler som passer til å være CDM, men så langt er altså ingen av disse teoriene bekreftet.

MEN...



kanskje det finnes en annen mulighet???

tenk tilbake på utledningen av rotasjonskurvene:

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Som tydelig er feil ifølge observasjoner, men hvilke antakelser gjorde du her? En mulig løsning var at antakelsen om at M er konstant ettersom du går utover er feil. Men hvis denne ikke er feil? La oss anta at M virkelig ikke endrer seg når du går utover, altså at vi ikke har noe usynlig mørk materie der. Hva annet kan være galt og som kunne gi en flat

rotasjonskurve? **Jeg har kanskje et forslag...**

Forrige side



side 45 av 42

Hva er mørk materie?

FORUM

Så flott at du har et forslag! Det vil jeg gjerne høre om...

Jo, nå skal du høre...

Forrige side



side 46 av 42

Hva er mørk materie?

FORUM

Hva om Newtons gravitasjonslov er feil? Newtons gravitasjon kommer jo bare fra Einsteins gravitasjonslov (den skal vi høre om senere i kurset) for svake gravitasjonsfelt. **Så hva som Einsteins gravitasjonslov (også kjent som den generelle relativitetsteorien) er feil???. Vi har jo strengt tatt bare testet gravitasjonsloven grundig over korte avstander, dvs. solsystem-størrelse. Vi har aldri direkte testet gravitasjonsloven over virkelig store avstander.** Kan det være at det vis er er at gravitasjonsloven ser forskjellige ut for store avstander?

Neste side



Det finnes også en annen grunn til at man studerer muligheten for at Einsteins gravitasjonslov må utvides. Det finnes nemlig en annen usynlig komponent i universets sammensetning som heter **mørk energi**. Vi skal ikke snakke om den i dette kurset, men den får universet til å utvide seg fortere og fortere. For å forklare denne så ser det virkelig ut som man kanskje trenger en modifisert gravitasjonslov. **Men hva om en slik modifisert gravitasjonslov også kan forklare galaktiske rotasjonskurver og andre observasjoner som indikerer eksistensen av mørk materie?** Ja da hadde vi ikke trengt den mørke materien.

Problemet er bare at ingen heller ikke har klart å lage en overbevisende modifisert gravitasjonsteori som gir oss både mørk materie og mørk energi. Hvis du er interessert og har lyst til å kikke på et av de mest populære modifiserte gravitasjonsteoriene, ta en kikke på [denne introduksjonen](#) om teorien MOND (MODified Newtonian Dynamics) hvor du også får se en modifisert versjon av Newtons gravitasjonslov som gir flate rotasjonskurver for galakser.



Der står forskningen! **Mørk materie?** (de fleste forskere heller nok til denne teorien) **eller** **modifisert gravitasjon?** **Eller** noe annet? Fremtidens forskere kan kanskje gi oss et svar. Kommer en av dem til å bli deg??

Hvis du synes dette er spennende og vil vite litt mer utenfor pensum, så finnes det en meget god 15-minutters TED-talk [på youtube her.](#)

Forrige side



Gratulerer, del 1F er overstått. Du bør nå:

- ha en god oversikt over elementærpartiklene i standardmodellen
- ha nok argumenter til å kunne overbevise naboen din om at det finnes mørk materie
- kunne forklare hva som er rart med galaktiske rotasjonskurver
- vite hvordan du kan kartlegge mørk materie i en galakse
- ha en anelse om hva mørk materie kan være og hvilke kategorier vi deler den opp i
- ... og at det spekuleres i at gravitasjonsloven kan være feil...

Flott hvis du nå kan klikke på smilefjesene over og fortelle hva du synes om dette interaktive forelesningsnotatet. Hva var bra og nøyaktig hva kan forbedres? All ris og ros mottas med takk!

Det anbefales nå at du sjekker [kortsvarsoppgavene](#) til del 1F for å kontrollere at du har forstått stoffet. Kan du svare på disse, blir det lettere å bruke kunnskapen din i oppgavene/prosjektet. Noen av disse kommer på eksamen.