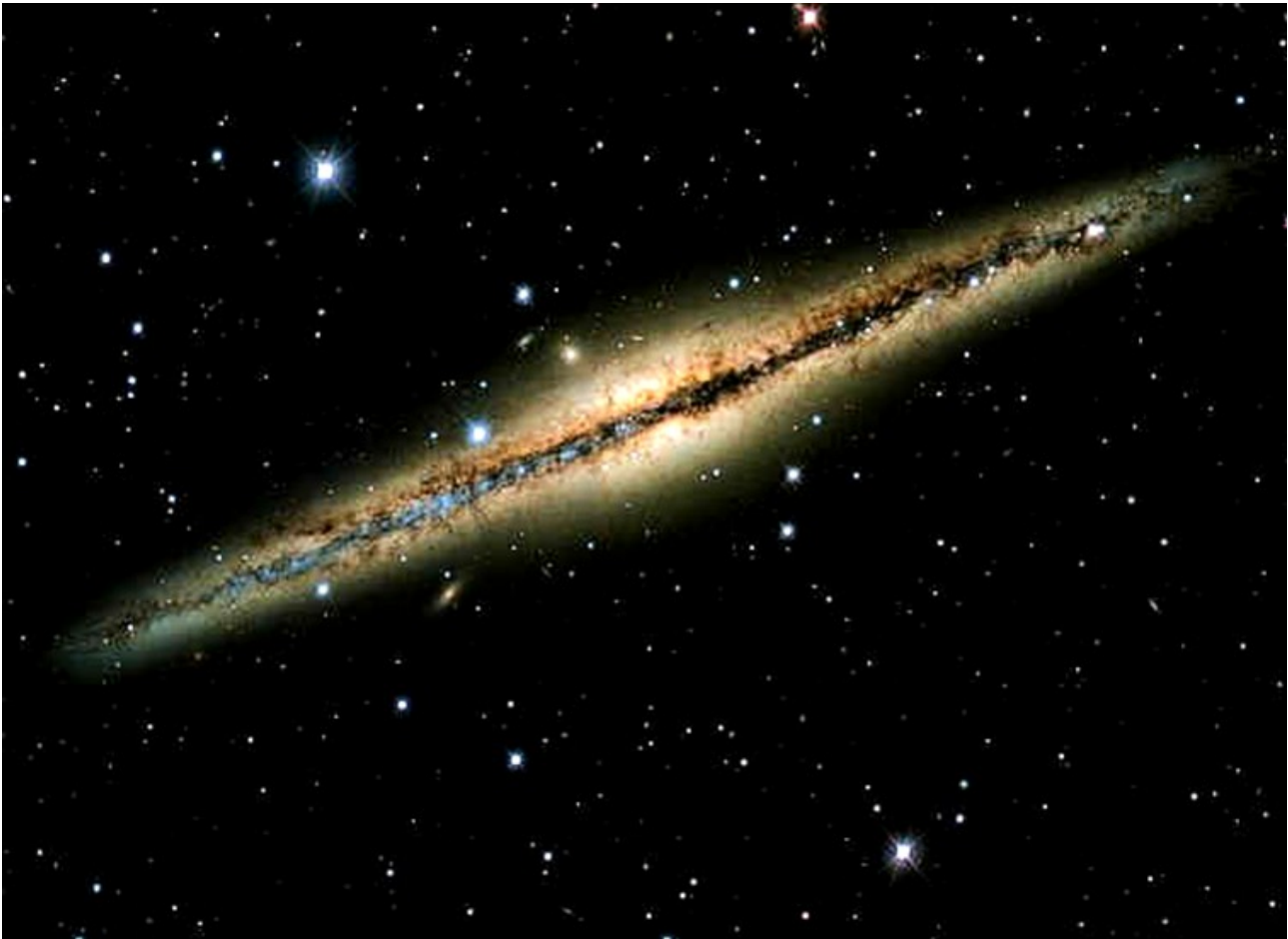


# Spiralgalakters masse

I denne øvelse vil vi undersøge, hvordan spiralgalakters inklinations kan bestemmes, og vi vil måle rotationen af spiralgalaksen *NGC 7083*. Derudover vil vi estimere dens masse.

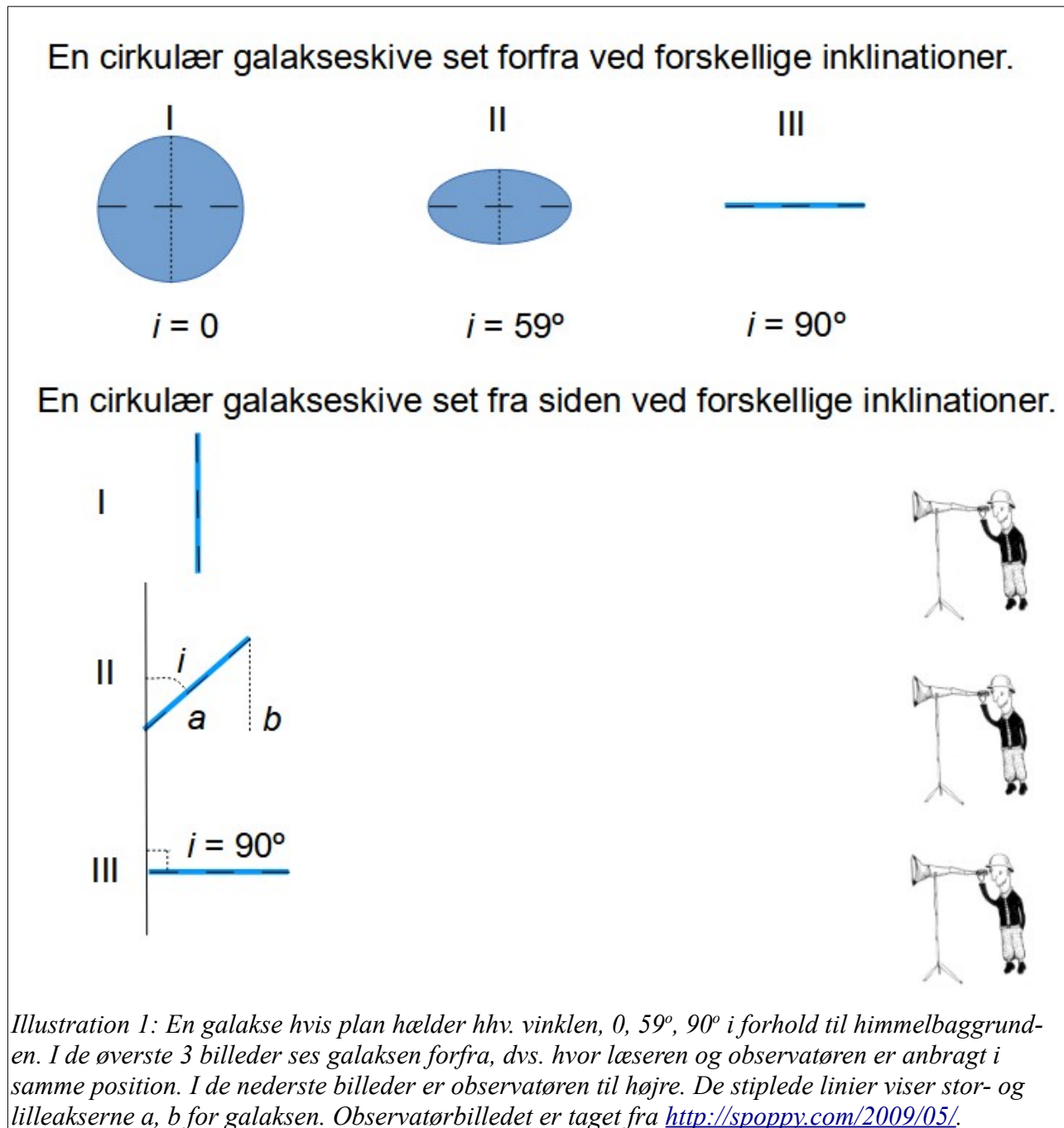
Øvelsen er stærkt inspireret af et foredrag, som Suzanne Faye afholdt på UPMC i Paris i januar 2013.



*Mælkevejen set i infrarødt lys. Kilde: Suzanne Faye.*

## Galakseres inklinations

Vi observerer galakser med alle mulige inklinationer,  $i$ , som er defineret som vinklen mellem himmelbaggrunden og galaksens plan. Se illustration 1.



### Øvelse 1

Tag en mønt og kig vinkelret ind på kanten. Drej derefter mønten mod lodret. Bemærk at mønten går fra at være en linie til at blive en ellipse og endelig til at være en cirkel.

## Øvelse 2

Benyt illustration 1 til at vise, at inklinationen,  $i$ , kan beregnes ved hjælp af formlen

$$i = \cos^{-1}\left(\frac{b}{a}\right), \quad (1)$$

hvor  $b$  er galaksens lilleakse, og  $a$  er galaksens storakse. ( $a$  og  $b$  er vist som de stiplede linier i næstnederste tegning i illustration 1.)

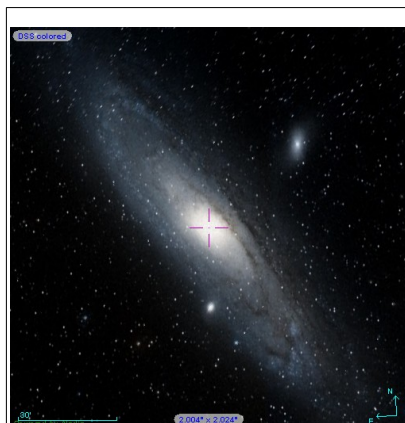


Illustration 2: M31 antages at være en cirkulær skive, men fordi galaksen er drejet i forhold til himmelbaggrunden, ser den oval ud.

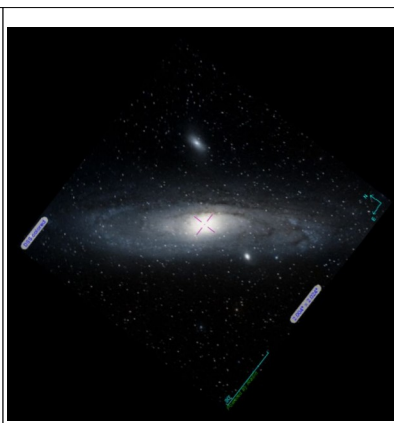


Illustration 3: M31 efter at billedet er roteret 52,5 grader.

Et billede af en galakse kan drejes omkring to akser: En der peger ud af papiret og en der ligger vinkelret derpå i papirets plan. Rotationen langs den akse, der peger ud af papirets plan, kan vi selv tage højde for ved at dreje billedet. Dette er vist på illustration 3.

På illustration 3 skyldes den ovale form altså alene, at M31 hælder i forhold til Himmelbaggrunden.

## Øvelse 3

Benyt *AstroImageJ* til at åbne et billede af Andromeda-galaksen, M31. Et billede er vedlagt det arkiv, hvor du fandt denne tekst. Du kan evt. selv downloade det vha Aladin<sup>1</sup>. Mål bredden og højden af galaksen og bestem galaksens inklinations ved hjælp af formel 1. Du skulle gerne få  $i \approx 77^\circ$ .<sup>2</sup> Se billedet af M31 i illustration 2 og 3. (Hint: Brug *linie*-værktøjet samt evt. *Plot profile*-værktøjet til aflæsningerne.)

## Galakserotation og spektre

Når vi lægger et diffraktionsgitter ind langs storaksen på en galakse, sådan at rillerne står parallelt på storaksen, opnår vi et spektrum, som er kendetegnet både ved de grundstoffer, som findes i galaksen, og ved galaksens radialbevægelse i forhold til os.

Et eksempel på et spektrum kan ses i illustration 4. Spektret er fra galaksen NGC 7083, som ligger i stjernebilledet Påfuglen på den sydlige nattehimmel. Man kan ikke se galaksen fra Danmark.

Spektret i illustration 4 ligner til en vis grad et spektrum opnået i laboratoriet, men der er en klar forskel – linierne bøjer, hvilket skyldes dopplereffekten. Formlen for dopplereffekten er

$$z = \frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}, \quad (2)$$

<sup>1</sup> <https://aladin.u-strasbg.fr/java/nph-aladin.pl?frame=downloading>

<sup>2</sup> <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0256-307X/18/10/339>

hvor  $v$  er lysgiverens radialhastighed,  $\lambda_0$  er laboratoriebølgelængden af en spektrallinie, og  $\Delta\lambda$  er forskydningen af bølgelængden. Vi kan altså måle bølgelængderne af spektrallinierne og dermed bestemme radialhastigheden forskellige steder i galaksens skive. Hvis galaksens plan hælder i forhold til himmelbaggrunden – hvad den normalt gør, så vil radialhastighederne ikke svare til rotationshastighederne. Derfor er det vigtigt at kende inklinationen af galaksen, så man kan regne de sande rotationshastigheder ud.

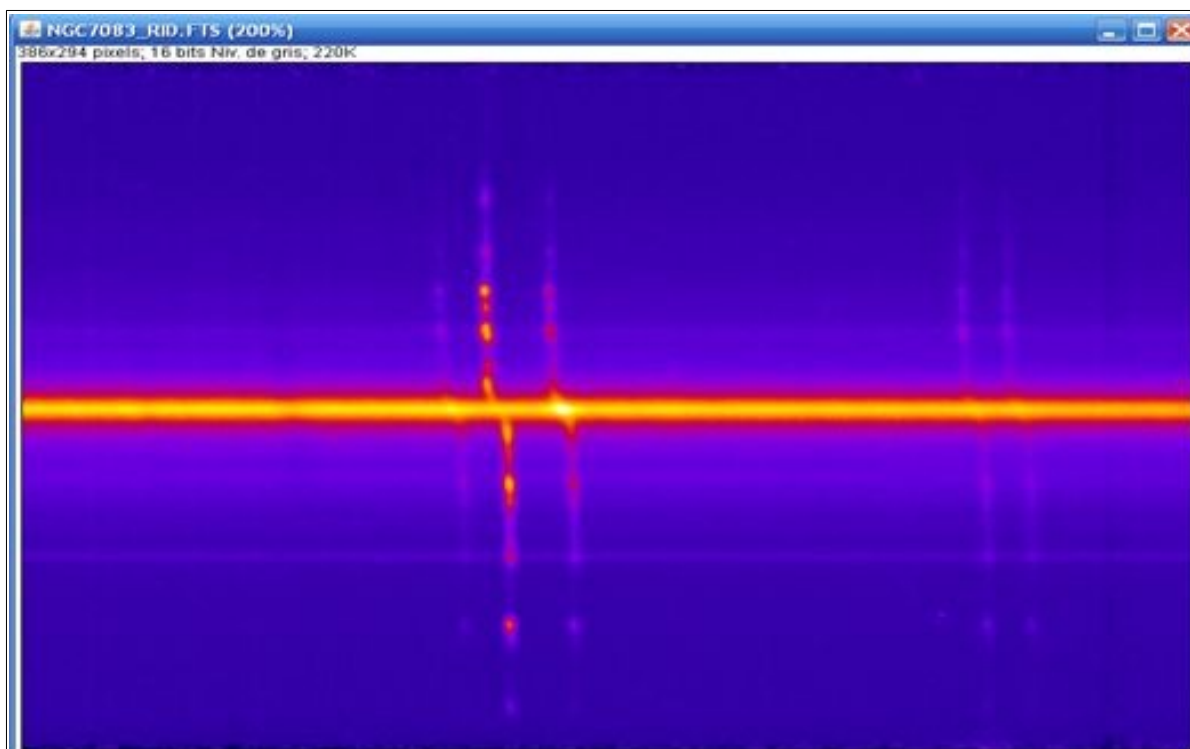


Illustration 4: Spektrum fra NGC 7083. Bemærk at linierne knækker over på midten. Det skyldes, at galaksen roterer, foruden at den bevæger sig væk fra os. Kilde: Suzanne Faye.

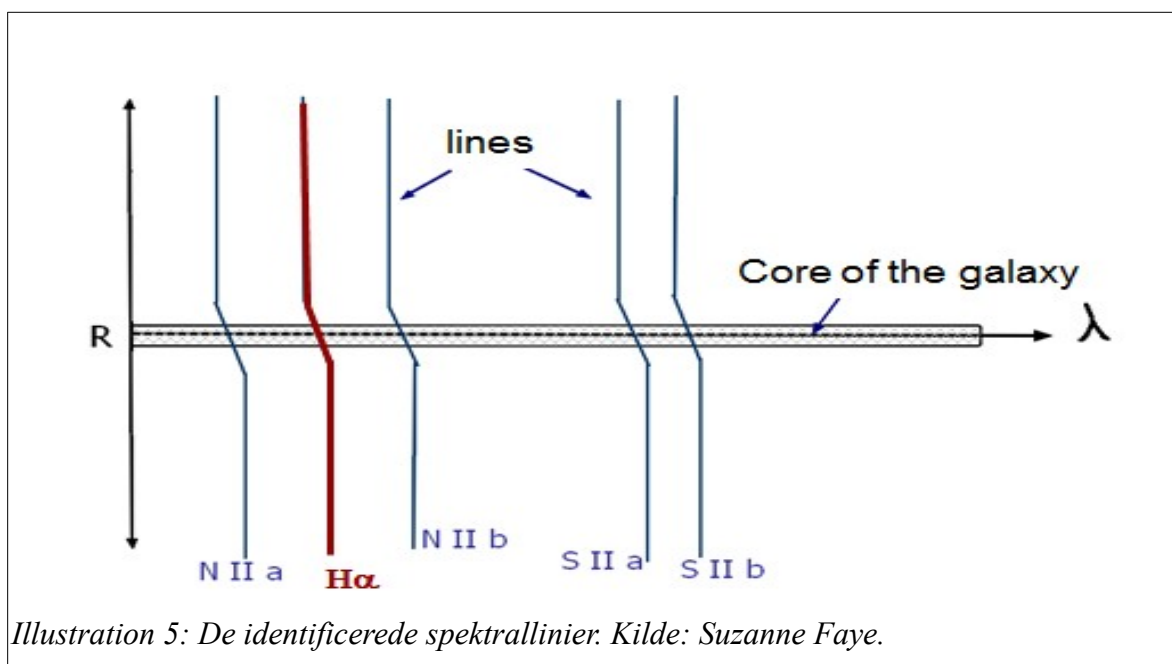


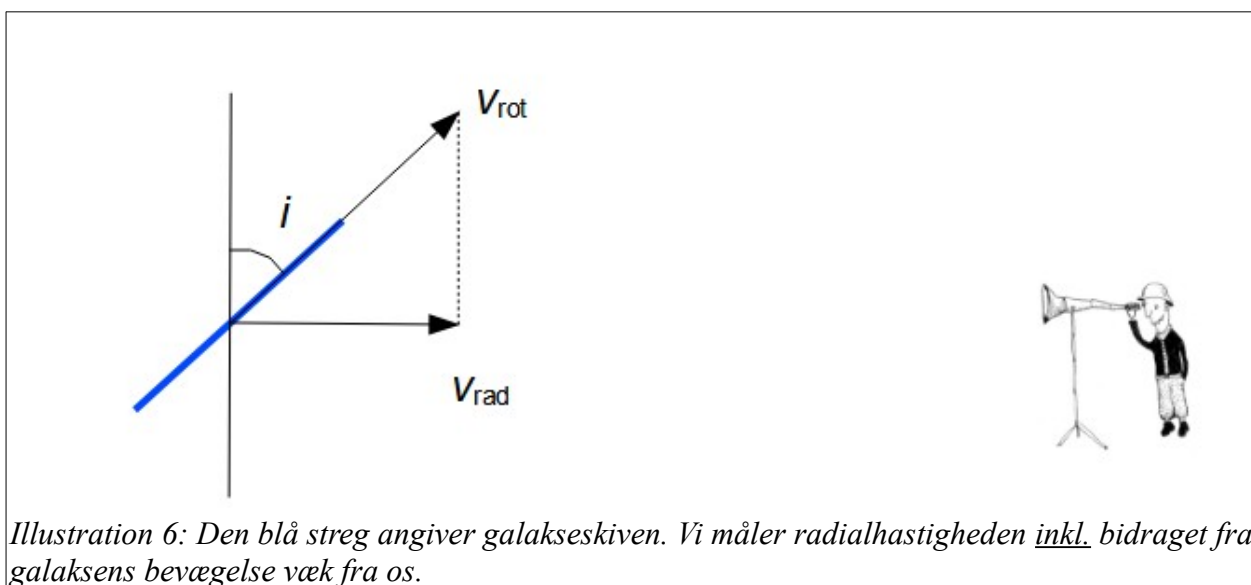
Illustration 5: De identificerede spektrallinier. Kilde: Suzanne Faye.

I tabel 1 kan man se laboratoriebølgelængderne for de anførte linier.

Betragt illustration 6. Her ses en galakse (blå streg) og rotationshastigheden et sted i galaksen er markeret. Radialhastigheden og inklinationen er de målbare størrelser.

Linie	$\lambda_0$ (Å)
<i>NIIa</i>	6548,0
<i>NIIb</i>	6583,5
<i>H<math>\alpha</math></i>	6562,8
<i>SIIa</i>	6716,0
<i>SIIb</i>	6731,0

Tabel 1: Laboratoriebølgelængderne. ( $10 \text{ Å} = 1 \text{ nm}$ ). Kilde: Suzanne Faye.



Af figuren ses følgende sammenhæng

$$\frac{v_{rad}}{v_{rot}} = \sin(i) \Leftrightarrow v_{rot} = \frac{v_{rad}}{\sin(i)} \quad (3)$$

#### Øvelse 4

- Udled formelen ovenfor.
- Opskriv dernæst en formel til at bestemme galaksens rotationshastighed, hvor du har taget højde for bidraget fra galaksens egenbevægelse væk fra os.

## Afstand til en galakse

Såfremt en galakse befinder sig i så stor en afstand, at den ikke er gravitationelt påvirket af Mælkevejen (*M31* er for eksempel bundet til Mælkevejen), kan vi bruge Hubbleloven til at finde afstanden til galaksen, såfremt vi har målt galaksens radialhastighed (hastigheden måles i centrum af galaksen). For rødforskydninger  $z < 0,1$  ser Hubbleloven<sup>3</sup> ud som følger

<sup>3</sup> Kilde: [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/planck/news/planck20130321.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/planck/news/planck20130321.html)

$$v_{rad} = H_0 \cdot d, \quad (4)$$

hvor  $H_0 = 67,3 \text{ km/(sMpc)}$ .<sup>4</sup>

## Galaksers masse

Hvis vi antager, at stjernerne i en spiralgalakse tilnærmelsesvist bevæger sig i cirkelbaner omkring massemidtpunktet, kan vi benytte Keplers 3. lov til at beregne den masse, der ligger indenfor den radius, som stjernens cirkelbane omkranser:

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G \cdot M}{4 \cdot \pi^2} \Leftrightarrow \frac{a^3}{\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot a}{v_{rot}}\right)^2} = \frac{G \cdot M}{4 \cdot \pi^2} \Leftrightarrow v_{rot}^2 \cdot a = G \cdot M \Leftrightarrow$$

$$M = \frac{a \cdot v_{rot}^2}{G}. \quad (5)$$

Dvs. hvis vi aflæser spektrallinierne så højt oppe (eller så langt nede) på spektret, som muligt, vil vi få bidraget fra det lys, der ligger længst væk fra galaksens kerne. Dermed kan vi estimere galaksens samlede masse.

Metoden går altså ud på følgende:

1. Mål hovedakserne,  $a$  og  $b$ , for *NGC 7083* og beregn inklinationen,  $i$ .
2. Udmål et spektrum af galaksen. Der er vedlagt et spektrum i arkivet med denne tekst.
3. Identificer linierne og bestem rød- eller blåforskydningerne,  $z$ , af galaksen – både i centret og ude i siderne.
4. Beregn radialhastighederne ved hjælp af Dopplers lov.
5. Beregn rotationshastigheden af galaksen ved hjælp af resultaterne i pkt 1 og 4.
6. Beregn afstanden til galaksen ved hjælp af Hubbleloven.
7. Beregn galaksens masse ved hjælp af Keplers 3. lov.

### Opgave 1

- a) Indlæs filerne *NGC7083.TIF* samt *NGC7083\_RID.FTS* i *AstroImageJ*. Vælg dernæst *View* i billedmenuen og hak af i *Invert None*.
- b) Forstør billedet af galaksen op og udmål de to hovedakser. Beregn inklinationen.
- c) Betragt billedet af spektret. Find  $x$ -pixelværdien for den kraftigste spektrallinie til venstre, -i midten, og nederst. Husk at spektrallinien faktisk ikke er en linie, fordi galaksen bevæger sig.

For at få den sande bevægelse, er det nødvendigt at kende laboratoriebølgelængden for mindst en af linierne i spektret, og den absolutte skala på billedet skal også kendes. Dette problem er allerede løst for os, da vi kan finde bølgelængden ved hjælp af formlen

$$\frac{\lambda}{\text{\AA}} = CDELT \cdot 1 \cdot (px - CRPIX \cdot 1) + CRVAL \cdot 1, \quad (6)$$

hvor  $px$  er  $x$ -pixelværdien for den betragtede spektrallinie.

<sup>4</sup> <https://arxiv.org/abs/1303.5076>

- d) Find konstanterne i *FITS*-headeren (CTRL+I), indsæt tallene i formel 6 og beregn den absolutte bølglængde de tre målte steder for den valgte spektrallinie.
- e) Beregn galaksens rødforskydning og radialhastighed ved hjælp af dopplerloven (2).
- f) Beregn rotationshastigheden ved hjælp af formel 3 set fra centrum af *NGC 7083*. Husk her at tage højde for inklinationen og galaksens bevægelse væk fra os. (Se øvelse 4.)
- g) Har du god tid, så gentag for de andre linier.
- h) Benyt Hubbleloven (4) og svaret fra spørgsmål e til at beregne afstanden til *NGC 7083*<sup>5</sup>.
- i) Benyt billedet af *NGC 7083* til at måle galaksens radius i bueminutter. (Læg mærke til at 1' er markeret i bunden af billedet. Mål f.eks. den længde i *px*, og benyt *AstroImageJs* kommandovindues *Analyze-Set Scale* til at lave en skala.) Beregn radius i kpc af galaksen ved brug af svaret fra spørgsmål h.
- j) Estimer galaksens masse ved hjælp af formel 5. (Husk at omregne til SI-enheder inden du putter tal ind i formlen.)

-0-

---

5 Du har målt den kinematiske hastighed, og strengt taget bør man tage højde for Solens og Mælkevejens egenbevægelse ift. baggrundsstrålingen. Denne korrektion er for denne galakse ganske ubetydelig, men det kan dog gøres ved hjælp af denne beregner: [http://ned.ipac.caltech.edu/velocity\\_calculator](http://ned.ipac.caltech.edu/velocity_calculator)