



# Astrofisica Generale I — 1a

Maurizio Tomasi ([maurizio.tomasi@unimi.it](mailto:maurizio.tomasi@unimi.it))

17 ottobre 2024



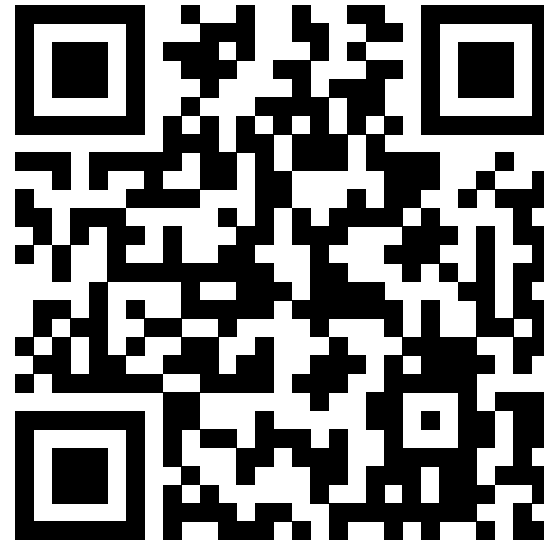
# Introduzione

- In questo primo modulo farò tre lezioni di approfondimento degli argomenti spiegati dal prof. Bersanelli.
- I contenuti specifici di queste lezioni non sono richiesti all'esame, ma i concetti esposti (es., magnitudini, correzioni bolometriche, ...) sono previsti nel programma e verranno chiesti all'esame.



# Queste slide

- Sono disponibili all'indirizzo [ziotom78.github.io/lezioni-astronomia/](https://ziotom78.github.io/lezioni-astronomia/).



- Ogni volta metterò a disposizione una copia PDF delle slide nel sito.



# Il centro galattico









# Dwek et al., ApJ (1995)

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 445:716–730, 1995 June 1  
© 1995. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

## MORPHOLOGY, NEAR-INFRARED LUMINOSITY, AND MASS OF THE GALACTIC BULGE FROM COBE DIRBE OBSERVATIONS

E. DWEK,<sup>1</sup> R. G. ARENDT,<sup>2</sup> M. G. HAUSER,<sup>5</sup> T. KELSALL,<sup>1</sup> C. M. LISSE,<sup>3</sup> S. H. MOSELEY,<sup>1</sup>  
R. F. SILVERBERG,<sup>1</sup> T. J. SODROSKI,<sup>2</sup> AND J. L. WEILAND<sup>4</sup>

Received 1994 June 8; accepted 1994 December 6

### ABSTRACT

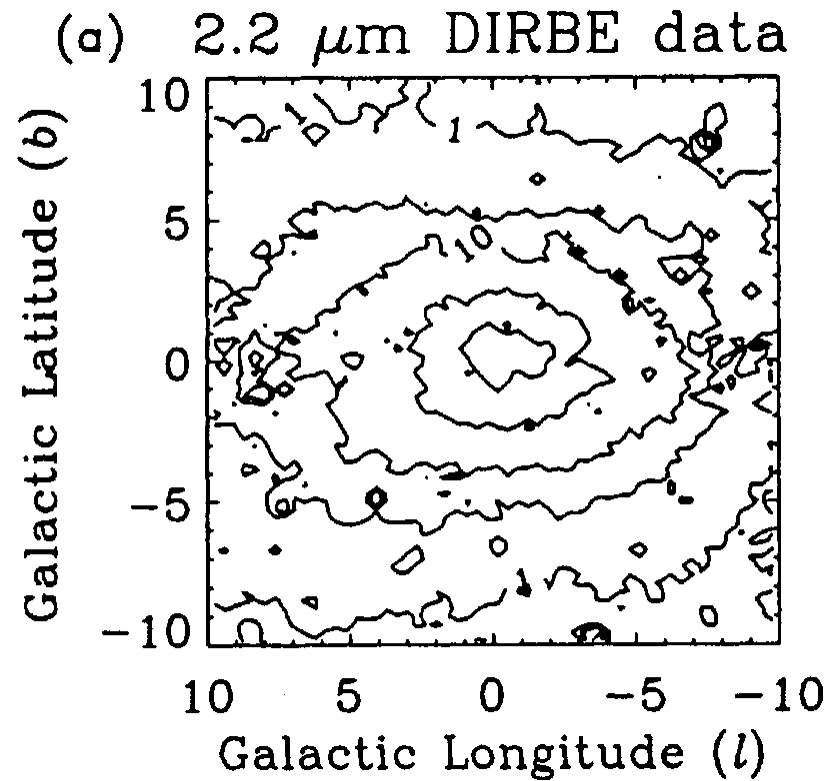
Near-infrared images of the Galactic bulge at 1.25, 2.2, 3.5, and 4.9  $\mu\text{m}$  obtained by the Diffuse Infrared Background Experiment (DIRBE) onboard the *Cosmic Background Explorer* (COBE) satellite are used to characterize its morphology and to determine its infrared luminosity and mass. Earlier analysis of the DIRBE observations (Weiland et al. 1994) provided supporting evidence for the claim made by Blitz & Spergel (1991) that the bulge is bar-shaped with its near end in the first Galactic quadrant. Adopting various triaxial analytical functions to represent the volume emissivity of the source, we confirm the barlike nature of the bulge and show that triaxial Gaussian-type functions provide a better fit to the data than other classes of functions, including an axisymmetric spheroid. The introduction of a “boxy” geometry, such as the one used by Kent, Dame, & Fazio (1991) improves the fit to the data. Our results show that the bar is rotated in the plane with its near side in the first Galactic quadrant creating an angle of  $20^\circ \pm 10^\circ$  between its major axis and the line of sight to the Galactic center. Typical axis ratios of the bar are  $\{1:0.33 \pm 0.11:0.23 \pm 0.08\}$ , resembling the geometry of prolate spheroids. There is no statistically significant evidence for an out-of-plane tilt of the bar at 2.2  $\mu\text{m}$ , and marginal evidence for a tilt of  $\approx 2^\circ$  at 4.9  $\mu\text{m}$ . The introduction of a roll around the intrinsic major axis of the bulge improves the “boxy” appearance of some functions.

A simple integration of the observed projected intensity of the bulge gives a bulge luminosity of  $1.2 \times 10^9$ ,  $4.1 \times 10^8$ ,  $2.3 \times 10^8$ , and  $4.3 \times 10^7 L_\odot$ , respectively, at 1.25, 2.2, 3.5, and 4.9  $\mu\text{m}$  wavelength for a Galactocentric distance of 8.5 kpc. The 2.2  $\mu\text{m}$  luminosity function of the bulge population in the direction of Baade’s window yields a bolometric luminosity of  $L_{\text{bol}} = 5.3 \times 10^9 L_\odot$ . Stellar evolutionary models relate this luminosity to the number of main-sequence progenitor stars that currently populate the red giant branch. Combined with the recent determination of the main-sequence turnoff mass for the bulge by the *Hubble Space Telescope* (Holtzman et al. 1993) we derive a photometrically determined bulge mass of  $\approx 1.3 \times 10^{10} M_\odot$  for a Salpeter initial mass function extended down to 0.1  $M_\odot$ .

*Subject headings:* Galaxy: structure — infrared: stars — Galaxy: stellar content



# Radianza spettrale (IR)

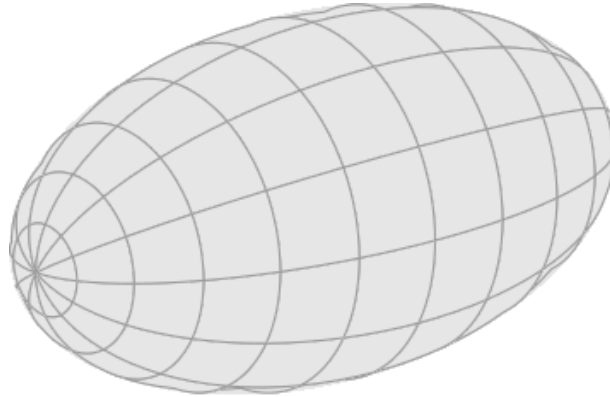


Misurata in MJy/sr ( $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W/m}^2/\text{Hz}$ , misura la densità di flusso).





# Emissività del *bulge*



Gli autori assumono che l'emissività  $\rho$  ( $[\rho] = \text{W m}^{-3}$ ) abbia la forma

$$\rho(x, y, z) = \rho_0 \exp(-r^2/2), \text{ con } r^2 = \frac{x^2 + y^2}{R_0^2} + \frac{z^2}{z_0^2},$$

con gli assi  $x, y, z$  liberi di ruotare nello spazio 3D.



# Intensità

- L'intensità  $I$  è l'emissività  $\rho$  proiettata lungo la linea di vista  $\mathbf{r}$  (con direzione data dalle coordinate  $l, b$ ):

$$I(l, b) = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty \rho(\mathbf{r}(s)) \, ds, \quad [I] = \text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}.$$

- Risolvendo l'integrale e facendo un fit (assumendo  $D = 8.5 \text{ kpc}$ ):

$$R_0 = 0.91 \pm 0.01 \text{ kpc} \approx 1.9 \times 10^8 \text{ AU},$$

$$z_0 = 0.51 \pm 0.01 \text{ kpc} \approx 1.0 \times 10^8 \text{ AU},$$

$$\rho_0 = (5.41 \pm 0.05) \times 10^7 L_\odot \text{ pc}^{-3}.$$



# Profilo del modello

- Gli autori hanno usato svariati modelli per il profilo di emissività:

$$\rho = \rho_0 \exp(-0.5r^2),$$

$$\rho = \rho_0 \exp(-r),$$

$$\rho = \rho_0(1 + r)^{-4},$$

$$\rho = \rho_0 r^{-1.8} \exp(-r^3),$$

...

- Due fit sono risultati i migliori: il modello Gaussiano a tre parametri  $(\rho_0, R_0, z_0)$  visto prima e il secondo elencato sopra.



# Esercizio sui dati di Dwek

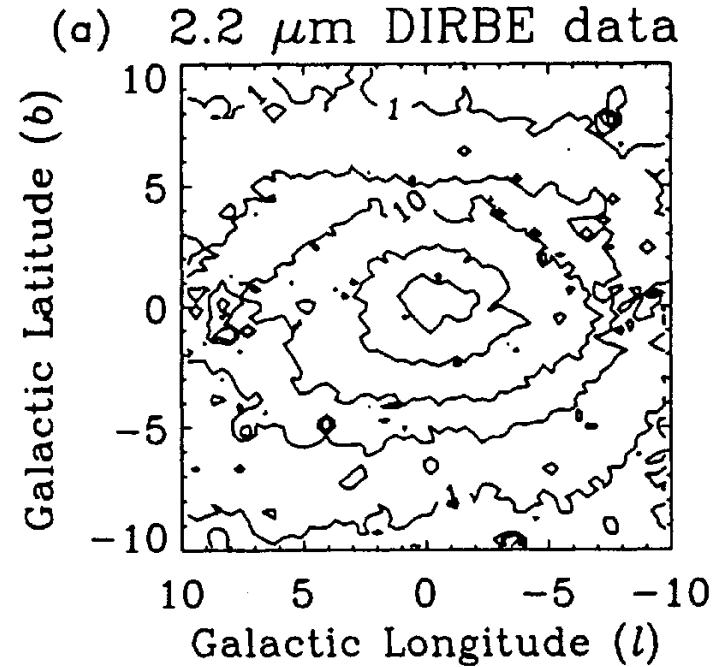


# Scopo dell'esercizio

- Vogliamo calcolare approssimativamente quante stelle sono presenti nel bulge galattico.
- L'articolo di Dwek dà quest'informazione. Noi però la ricaveremo partendo dal grafico del flusso IR a  $2.2 \mu\text{m}$  e stimando la luminosità tipica di una stella in questa regione.



# Densità di flusso nell'infrarosso



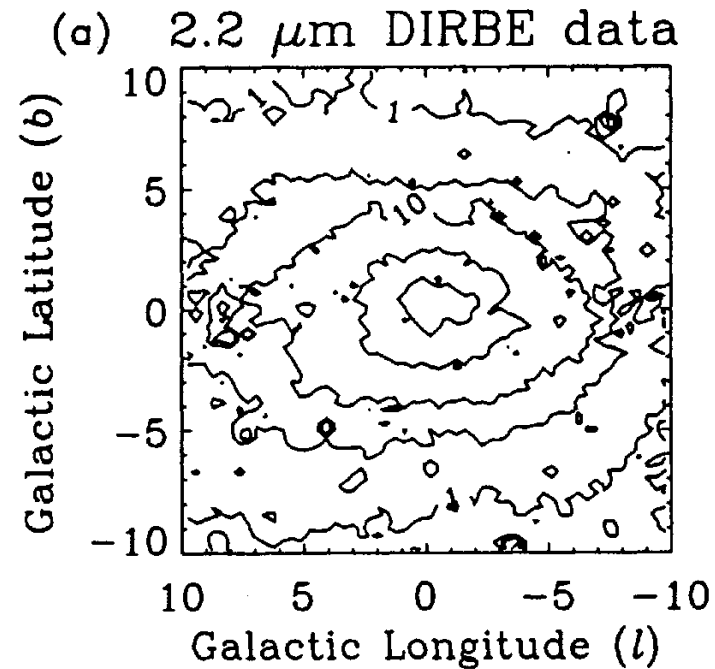
Per stimare  $L_\nu$  ( $[L_\nu] = W$ ) usiamo  $D = 8.5 \text{ kpc}$  e

$$L_\nu = 4\pi D^2 F_\nu \Delta\nu.$$





# Densità di flusso nell'infrarosso

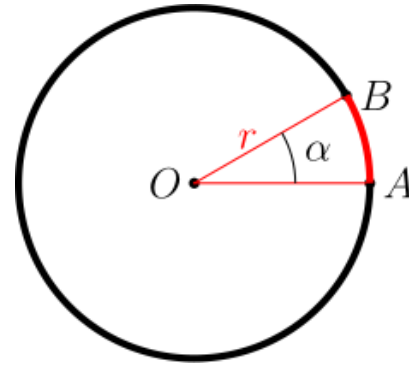


Ci serve quindi  $F_\nu$  (densità di flusso,  $[F_\nu] = \text{Jy}$ ), ma il grafico fornisce la radianza spettrale ( $\text{MJy/sr}$ )!



# Angoli solidi

Ricordiamo la definizione di radiante:



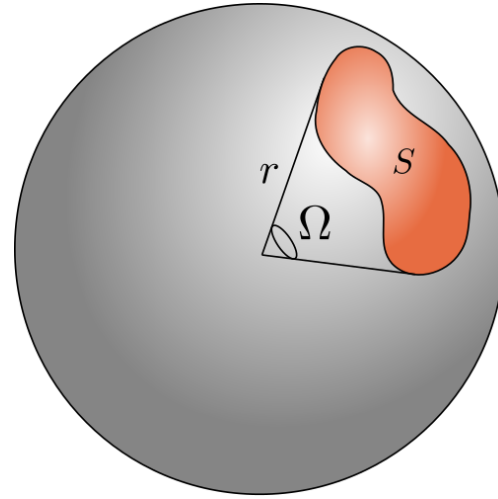
- Il *radiante* è l'angolo  $\alpha$  per cui  $AB = r$ , così che

$$AB = \alpha r.$$

- Una circonferenza ha un'ampiezza di  $2\pi$  rad.



# Angoli solidi



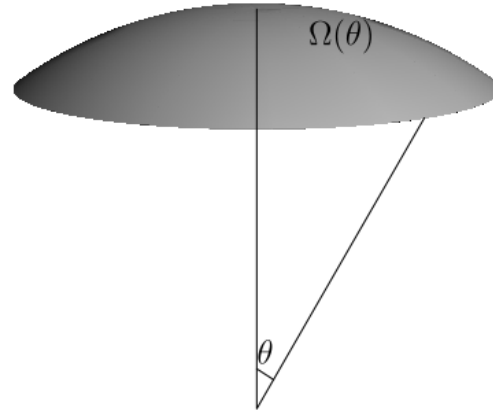
- Lo steradiano è l'angolo  $\Omega$  tale per cui  $S = r^2$ , così che

$$S = \Omega r^2.$$

- La sfera ha un'ampiezza di  $4\pi$  sterad.



# Angoli solidi



$$d\Omega = \sin \theta \, d\theta \, d\phi,$$

$$\Omega(\theta) = \int_0^\theta \int_0^{2\pi} d\Omega = 2\pi(1 - \cos \theta).$$



# Piccoli angoli

- Se abbiamo a che fare con valori piccoli di  $\theta$ , la formula si riduce a

$$\begin{aligned}\Omega(\theta) &\approx 2\pi \left( \frac{1}{2}\theta^2 + o(\theta^3) \right) = \\ &= \pi\theta^2,\end{aligned}$$

molto simile alla formula per l'area del cerchio ( $\pi r^2$ ).

- Possiamo quindi supporre che per una superficie ellittica con angoli  $a$  e  $b$  piccoli si abbia  $\Omega(a, b) \approx \pi ab$ .



# Piccoli angoli

- In quali unità di misura vanno espressi gli angoli perché valga  $\Omega \approx \pi ab$ ?
- Siccome la formula

$$\cos \theta \stackrel{\theta \rightarrow 0}{\approx} \frac{1}{2}\theta^2 + o(\theta^3),$$

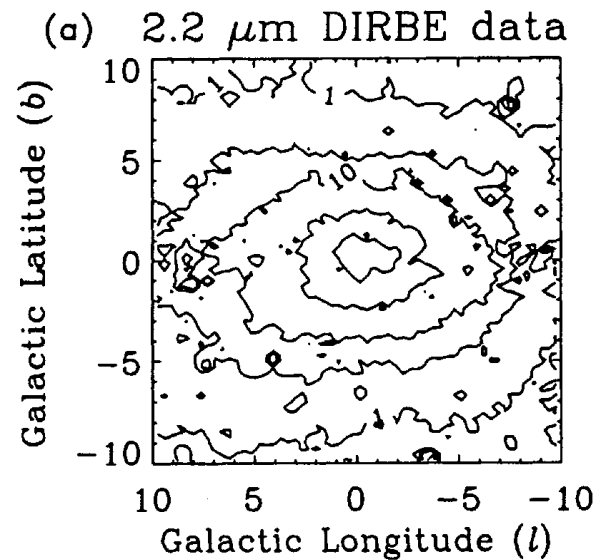
vale se  $\theta$  è in *radianti*, se vogliamo usare i gradi occorre usare

$$\Omega \approx \frac{\pi^3}{180^2} ab.$$

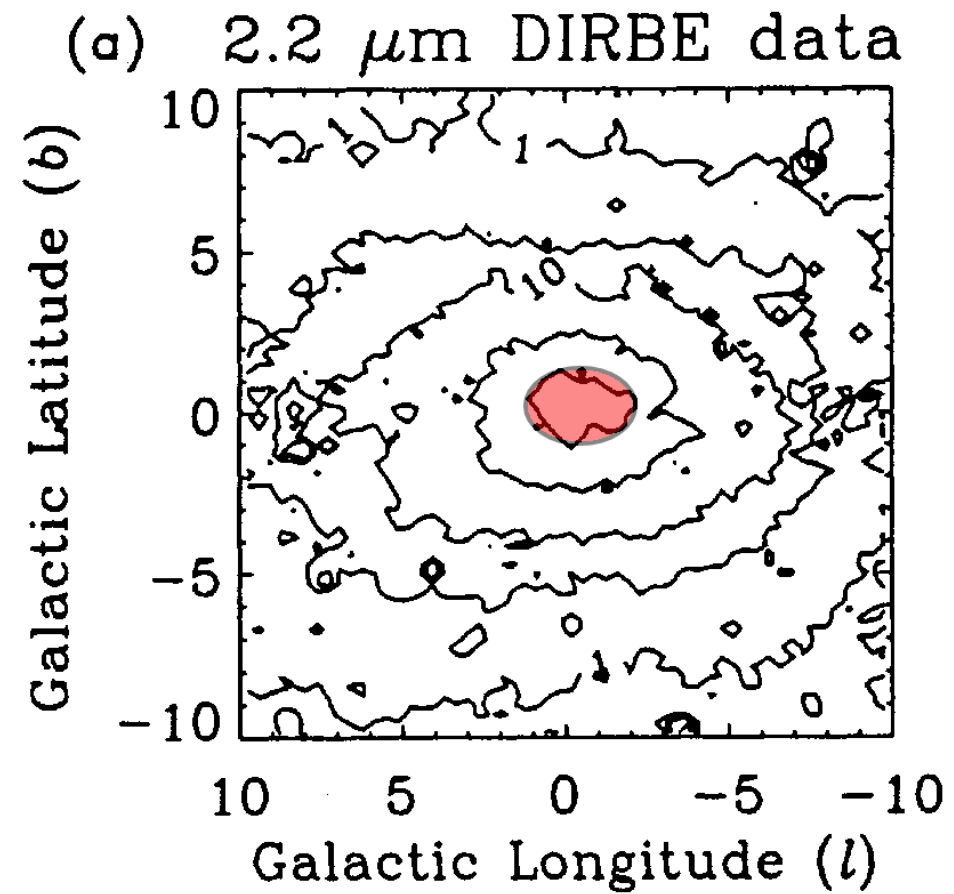




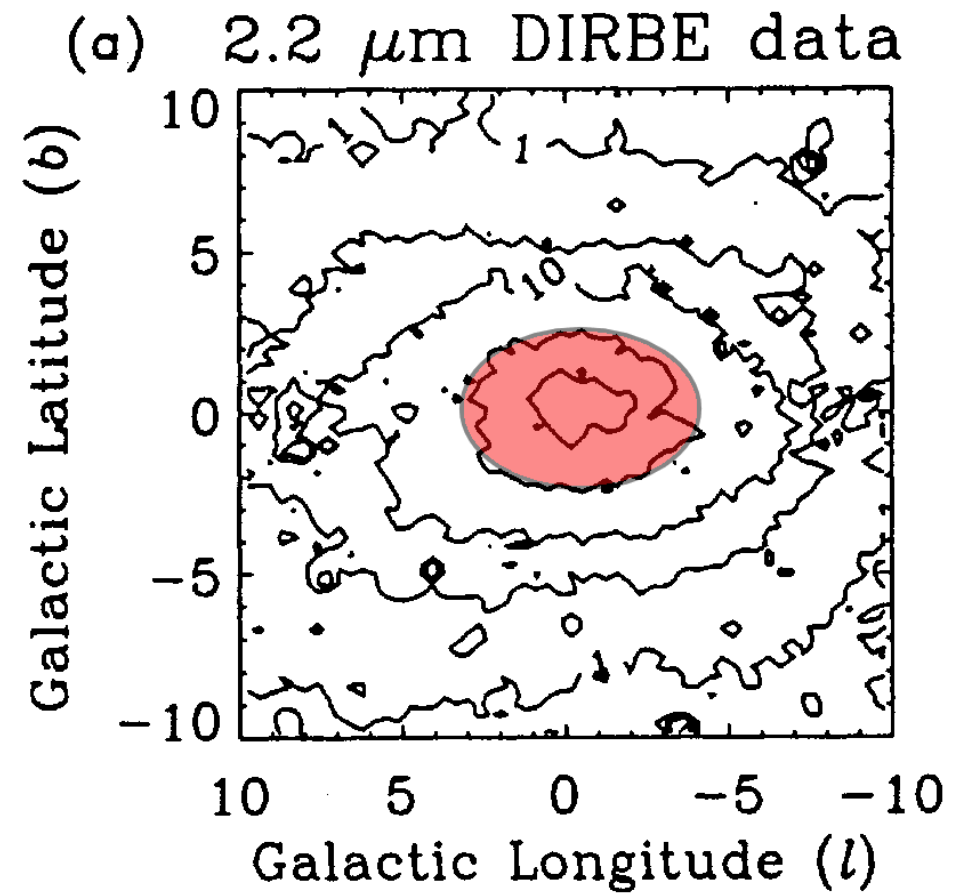
# Densità di flusso nell'infrarosso



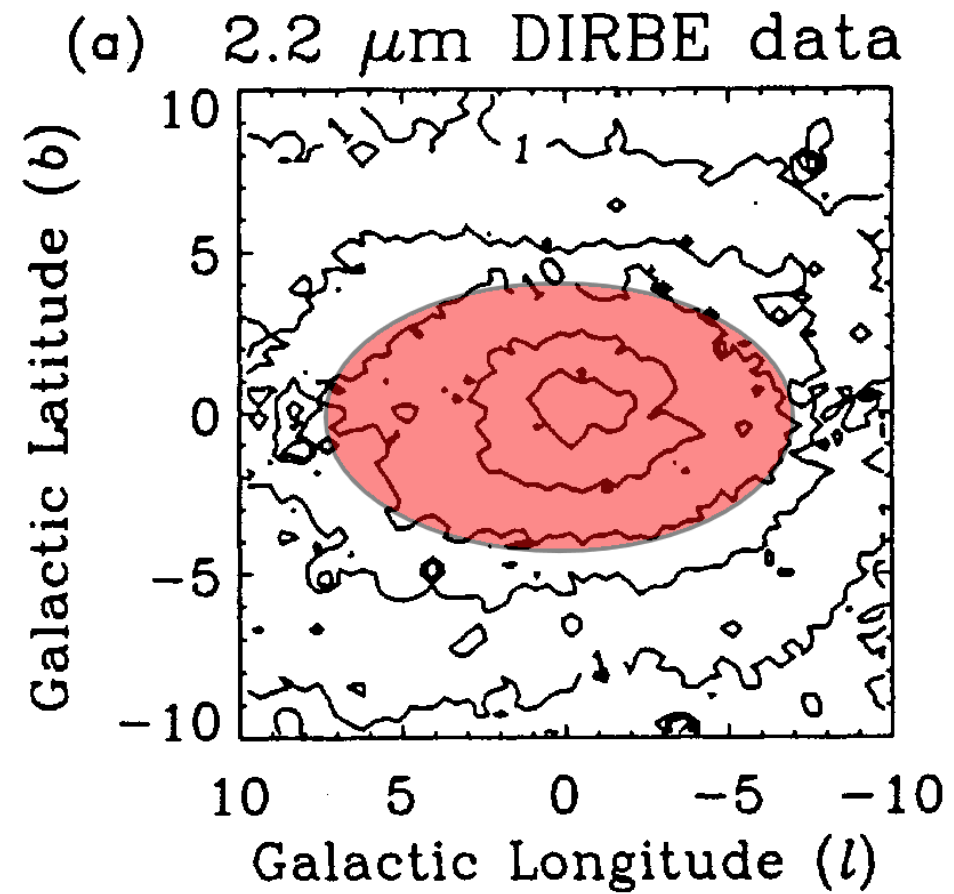
- Per stimare  $L_\nu$  ( $[L_\nu] = \text{W}$ ) usiamo  $L_\nu = 4\pi D^2 F_\nu \Delta\nu$ .
- Ci serve quindi  $F_\nu$  (densità di flusso,  $[F_\nu] = \text{Jy}$ ), ma il grafico fornisce la radianza spettrale ( $\text{MJy/sr}$ )!



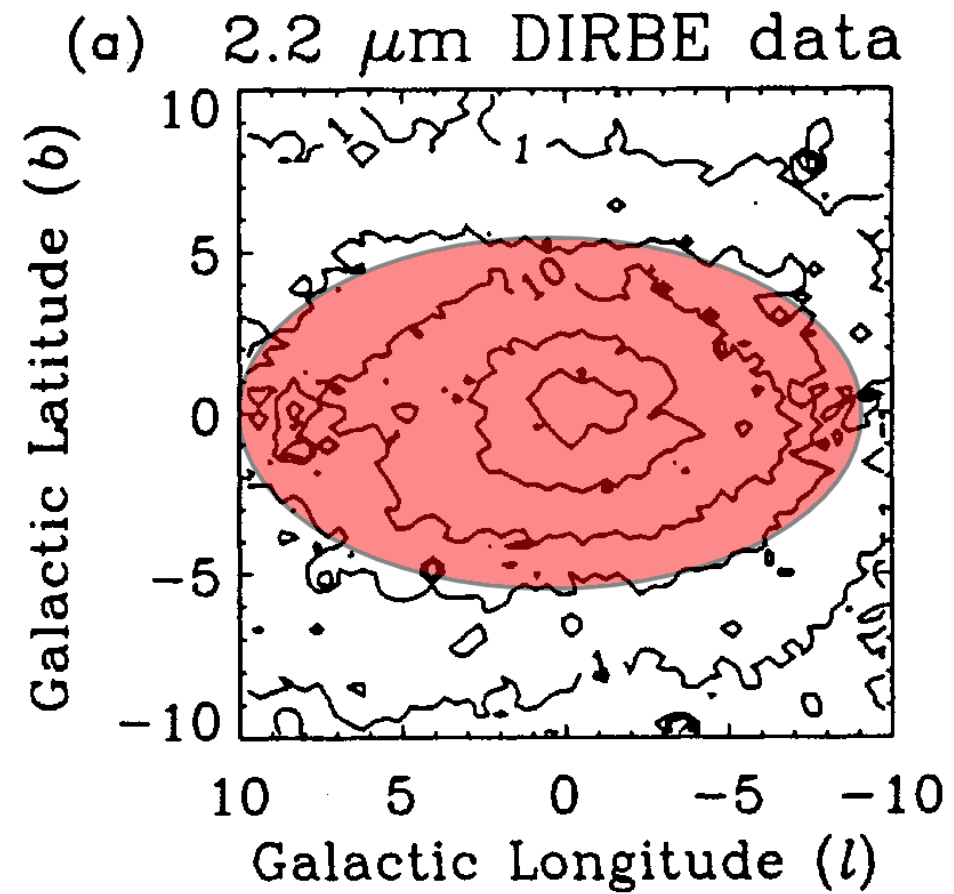
Ellisse di  $3^\circ \times 2^\circ$ : 100 MJy/sr.



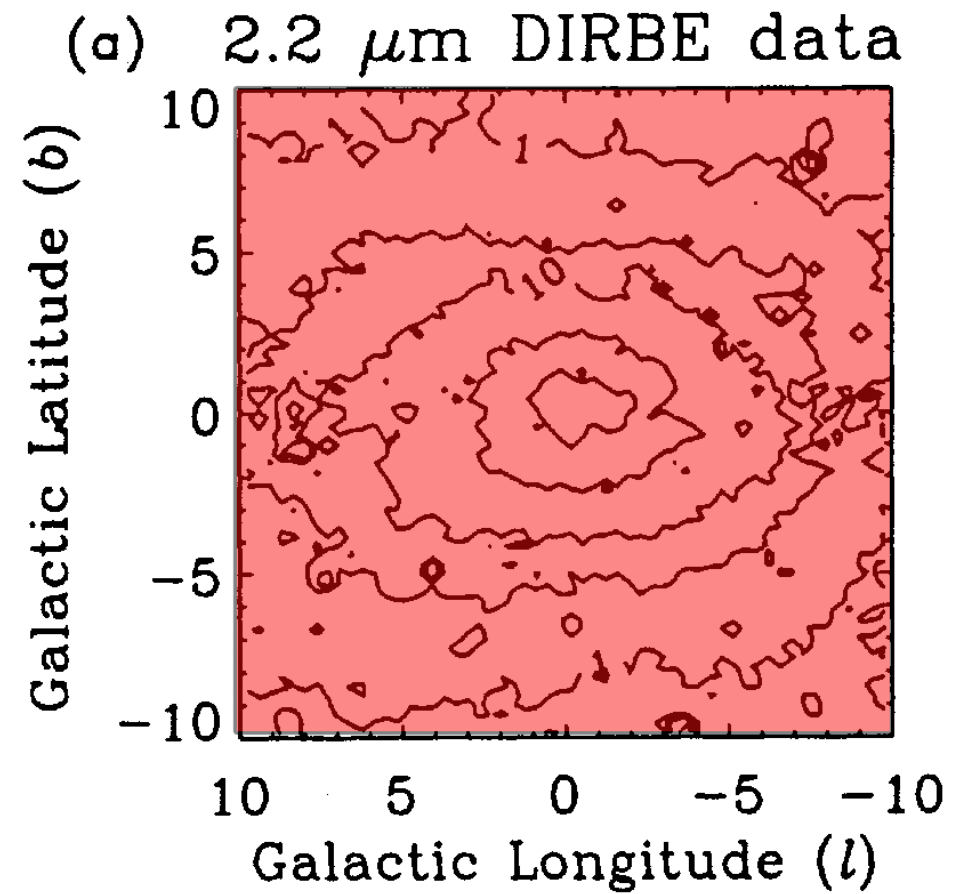
Ellisse di  $5^\circ \times 4^\circ$ : 50 MJy/sr.



Ellisse di  $13^\circ \times 8^\circ$ : 10 MJy/sr.



Ellisse di  $17^\circ \times 12^\circ$ : 5 MJy/sr.



Rettangolo di  $20^\circ \times 20^\circ$ : 1 MJy/sr.





# Densità di flusso

Abbiamo quindi identificato queste regioni:

Superficie	Forma	$2a$	$2b$	Flusso IR
$S_1$	Ellisse	$3^\circ$	$2^\circ$	$I_1 = 100 \text{ MJy/sr}$
$S_2$	Ellisse	$5^\circ$	$4^\circ$	$I_2 = 50 \text{ MJy/sr}$
$S_3$	Ellisse	$1^\circ$	$8^\circ$	$I_3 = 10 \text{ MJy/sr}$
$S_4$	Ellisse	$1^\circ$	$12^\circ$	$I_4 = 5 \text{ MJy/sr}$
$S_5$	Rettangolo	$2^\circ$	$20^\circ$	$I_5 = 1 \text{ MJy/sr}$



# Densità di flusso totale

Nell'approssimazione che gli angoli siano piccoli ( $20^\circ$  è piccolo?!?), il flusso totale IR è

$$F_{\text{IR}} \approx \frac{\pi^2}{180^2} \left( \pi a_1 b_1 I_1 + \right. \\ \left. (\pi a_2 b_2 - \pi a_1 b_1) I_2 + \right. \\ \left. (\pi a_3 b_3 - \pi a_2 b_2) I_3 + \right. \\ \left. (\pi a_4 b_4 - \pi a_3 b_3) I_4 + \right. \\ \left. (a_5 b_5 - \pi a_4 b_4) I_5 \right).$$



# Densità di flusso totale

- Sostituendo:

$$F_\nu \approx 0.64 \text{ MJy} = 6.4 \times 10^{-21} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}.$$

Ma questo valore è un po' più basso di quello riportato nell'articolo:

$$F_\nu = 7.3 \times 10^{-21} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}.$$

- Secondo voi, avremmo potuto aspettarci che il valore esatto fosse *maggiore* della nostra stima?



# Dal flusso alla luminosità

- A  $2.2\mu\text{m}$  la banda di DIRBE è

$$\Delta\nu = 2.28 \times 10^{13} \text{ Hz.}$$

- Quindi il flusso nella banda è

$$F_{\text{IR}} = F_\nu \Delta\nu = 1.5 \times 10^{-7} \text{ W m}^{-2}.$$

- Ma questo è il flusso nella banda di DIRBE, mentre per il nostro scopo serve il flusso su *tutto lo spettro*. Ci occorre quindi una correzione bolometrica, data dagli autori:  $C = 14.5$ .



# Luminosità

- Dal flusso totale  $F = F_\nu \Delta\nu$  e dalla correzione bolometrica  $C$  ricaviamo che

$$L = (4\pi D^2) (F_\nu \Delta\nu) C \approx 5.4 \times 10^9 L_\odot.$$

- Se una stella tipica del bulge ha una luminosità  $L \sim 400 L_\odot$ , allora il numero  $N$  di stelle nel bulge Galattico è circa

$$N \approx 10^7.$$