

Astrofísica Galáctica e Extragaláctica

AGA 299 – IAG/USP

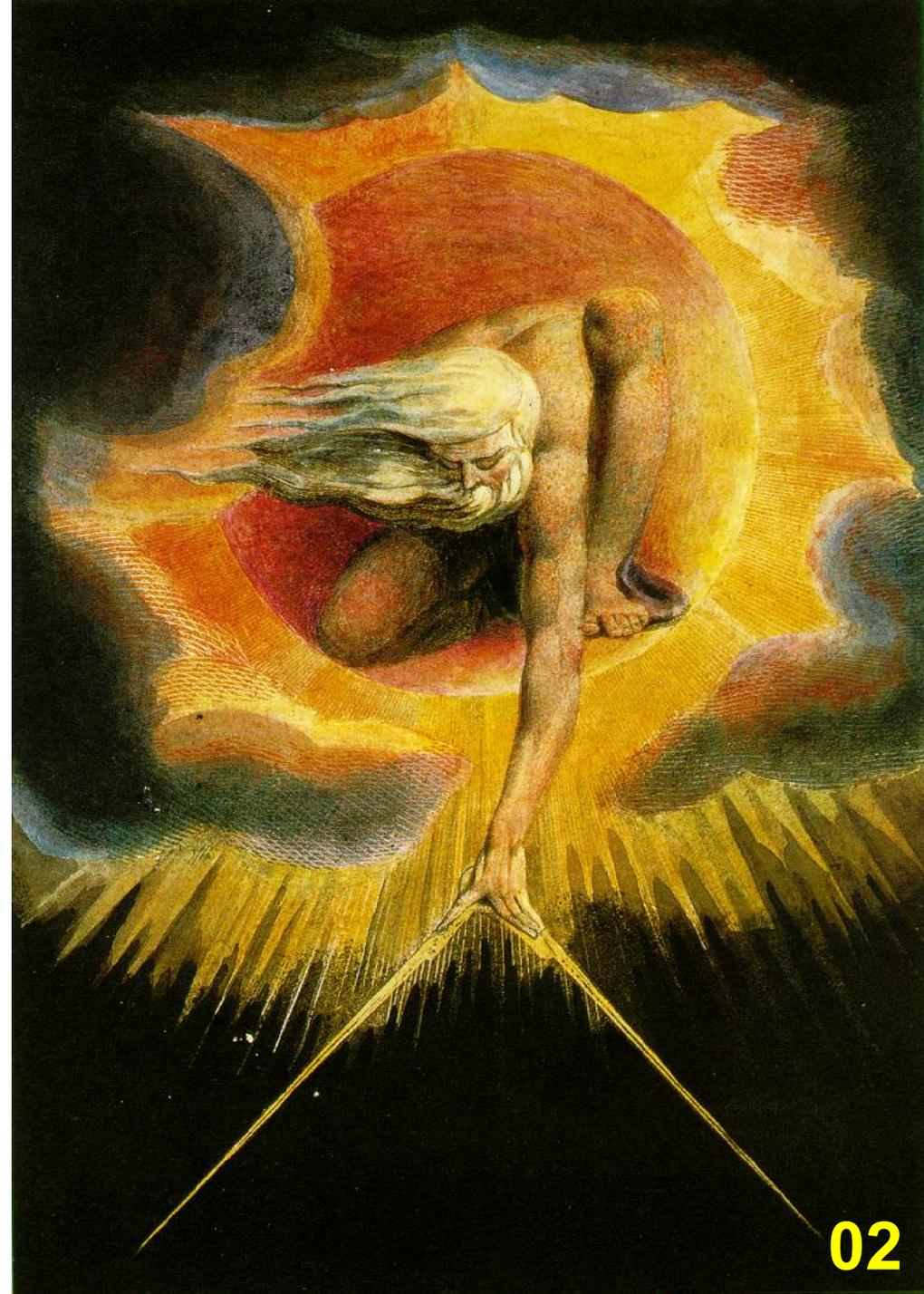


Ronaldo E. de Souza
redsouza48@usp.br
Abril, 2024

3

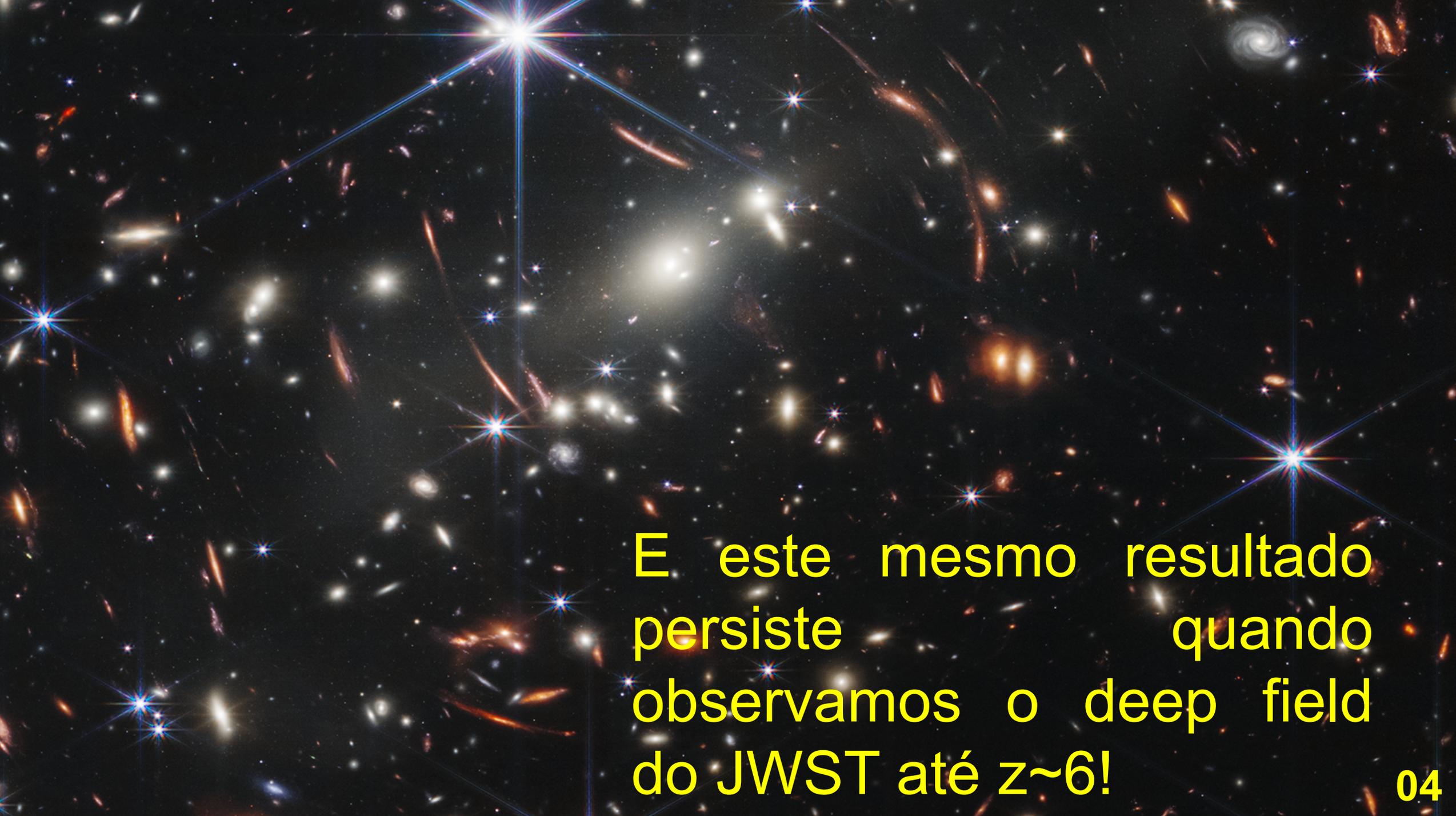
Propriedades Integradas

As propriedades das galáxias apresentam diferentes graus de regularidade que em princípio devem ser mensuradas para nos guiar no processo de entender suas estruturas e como estes objetos se formaram e evoluíram.

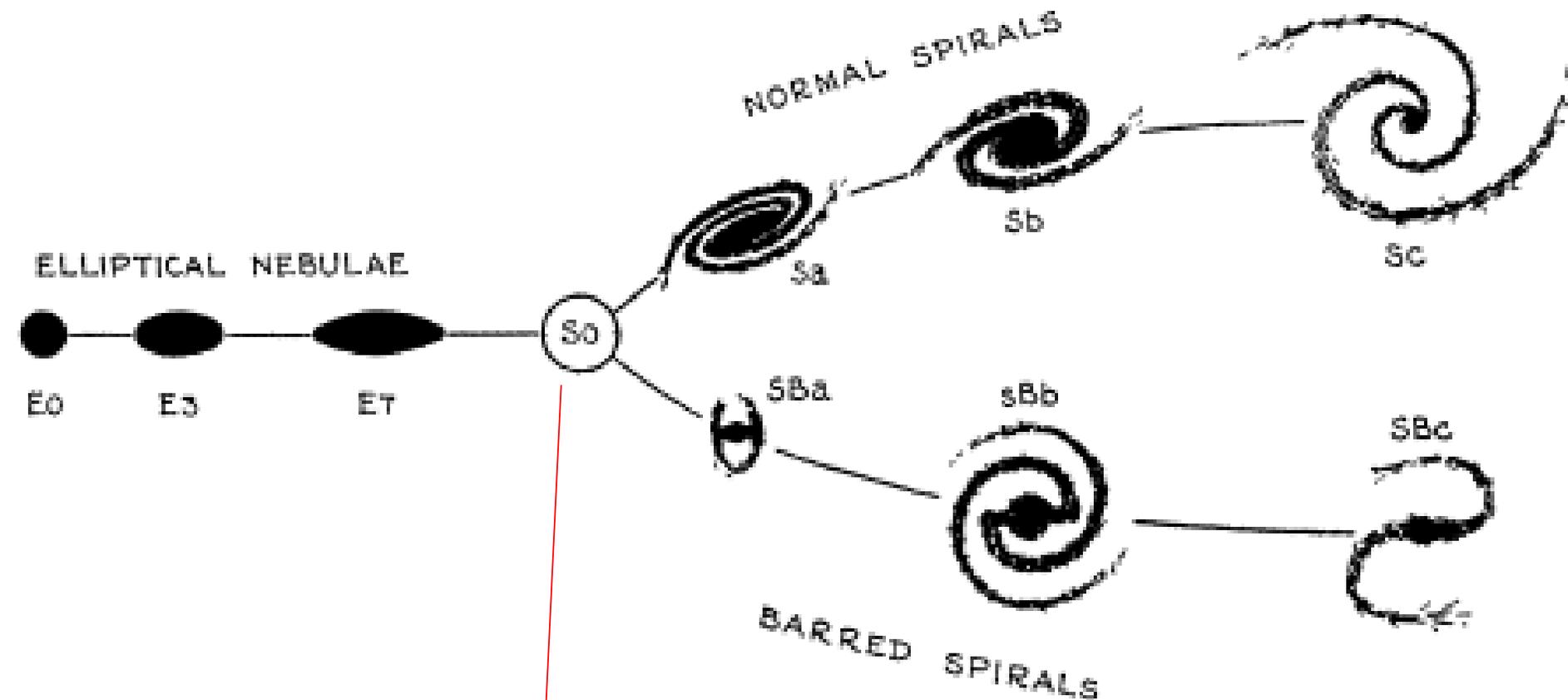


A deep-field image of the universe showing a vast field of galaxies. The galaxies are in various colors, including yellow, orange, blue, and purple, and are scattered across the dark background. Some galaxies are bright and clear, while others are faint and distant. The overall scene is a rich and diverse collection of cosmic structures.

A maioria das galáxias podem ser dividida em apenas duas grandes categorias: espirais e elípticas.



E este mesmo resultado
persiste quando
observamos o deep field
do JWST até $z \sim 6$!



Esquema original de Hubble

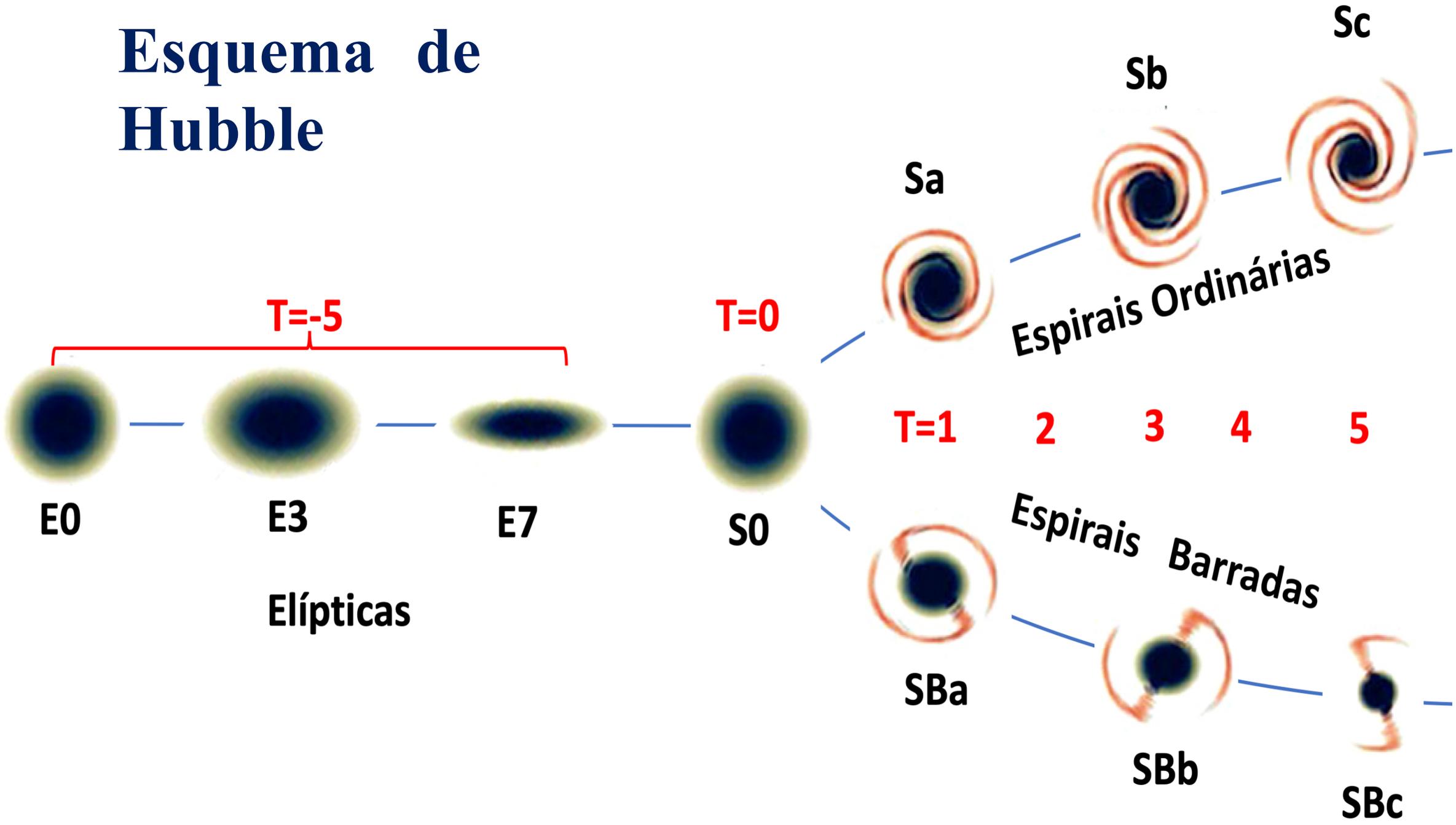
FIG. 1. *The Sequence of Nebular Types.*

The diagram is a schematic representation of the sequences of classification. A few nebulae of mixed types are found between the two sequences of spirals. The transition stage, S0, is more or less hypothetical. The transition between E7 and SB_a is smooth and continuous. Between E7 and S_a, no nebulae are definitely recognized.

T	Símbolo	Descrição	THubble
-6	cE	Elípticas Compactas	E
-5	E	Elípticas	
-4	E ⁺	Elípticas de transição	
-3	S0 ⁻	Lenticulares de classe jovem	S0
-2	S0 ⁰	Lenticulares intermediárias	
-1	S0 ⁺	Lenticulares tardias	
0	S0/a		S0/a
1	Sa	Espirais do tipo a	Sa
2	Sab		Sa-b
3	Sb	Espirais do tipo b	Sb
4	Sbc		Sb-c
5	Sc	Espirais do tipo c	Sc
6	Scd		
7	Sd	Espirais do tipo d	
8	Sdm		Sc-Irr
9	Sm	Irregulares do tipo Nuvem de Magalhães	Irr
10	Im	Irregulares sem traços de braços	

Esquema de Hubble ampliado com estágio numérico.

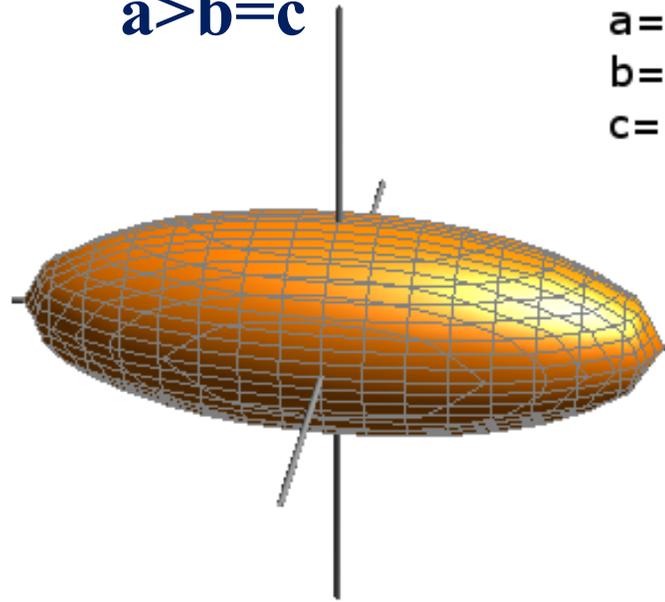
Esquema de Hubble



elipsoide prolato

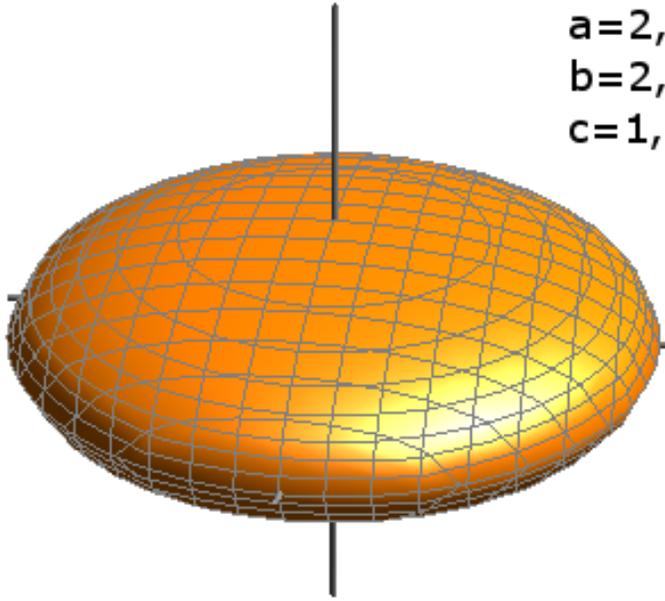
$$a > b = c$$

$$\begin{aligned} a &= 2,9 \\ b &= 1,0 \\ c &= 1,0 \end{aligned}$$



Galáxias Elípticas

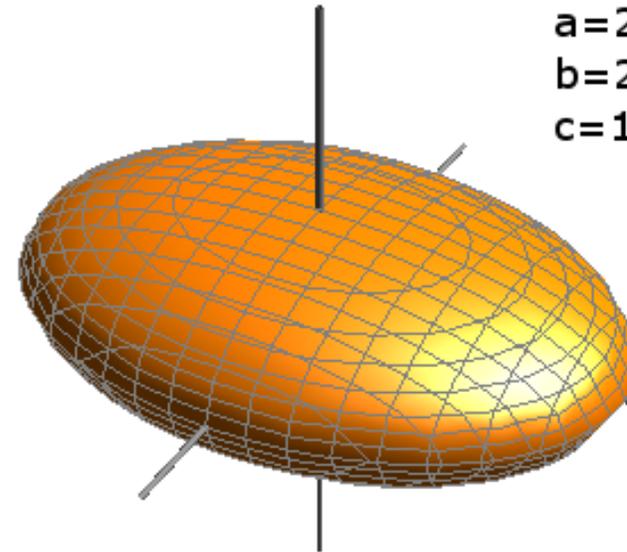
$$\begin{aligned} a &= 2,9 \\ b &= 2,9 \\ c &= 1,0 \end{aligned}$$



elipsoide oblato

$$c < a = b$$

$$\begin{aligned} a &= 2,9 \\ b &= 2,0 \\ c &= 1,0 \end{aligned}$$

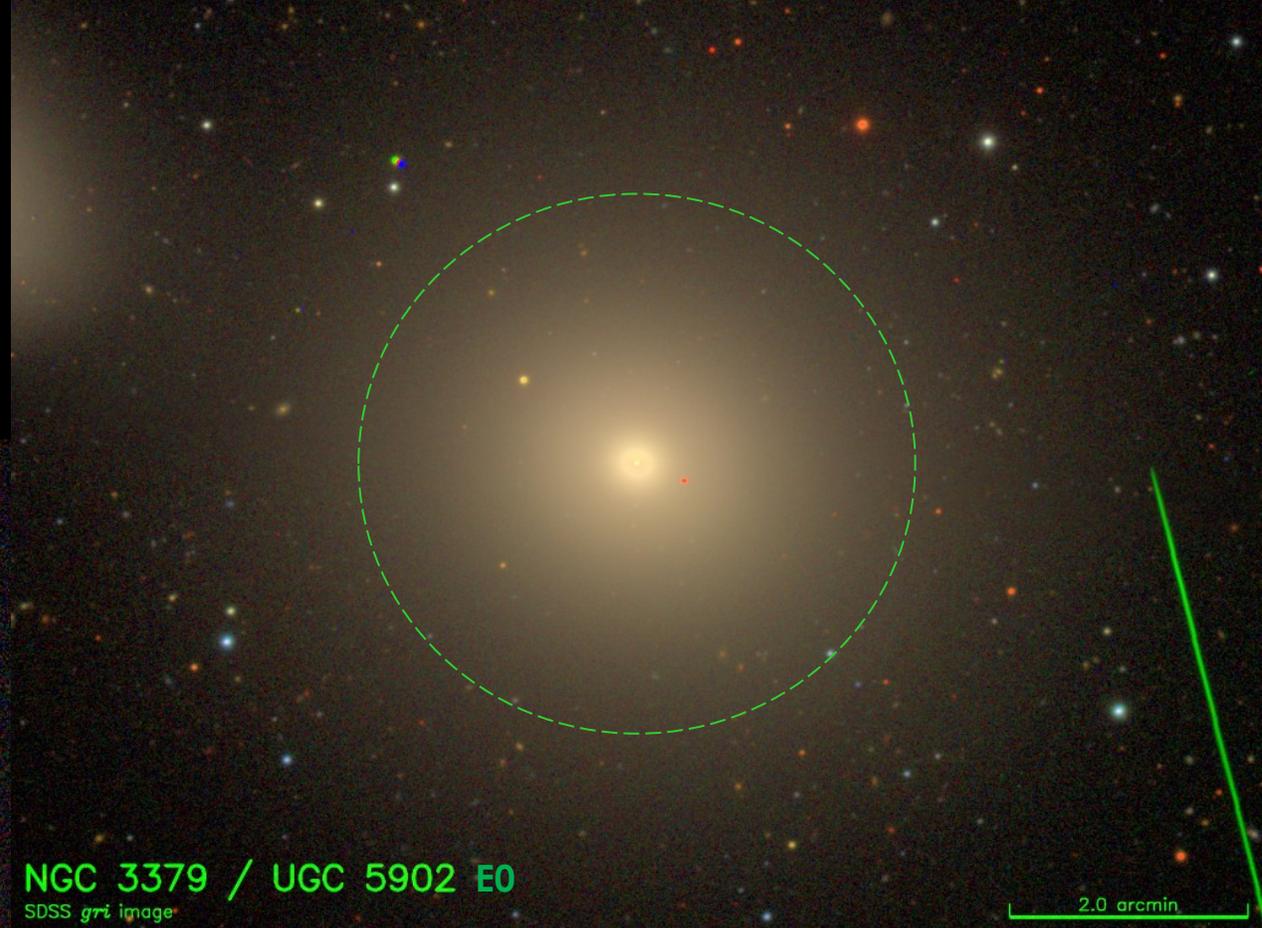
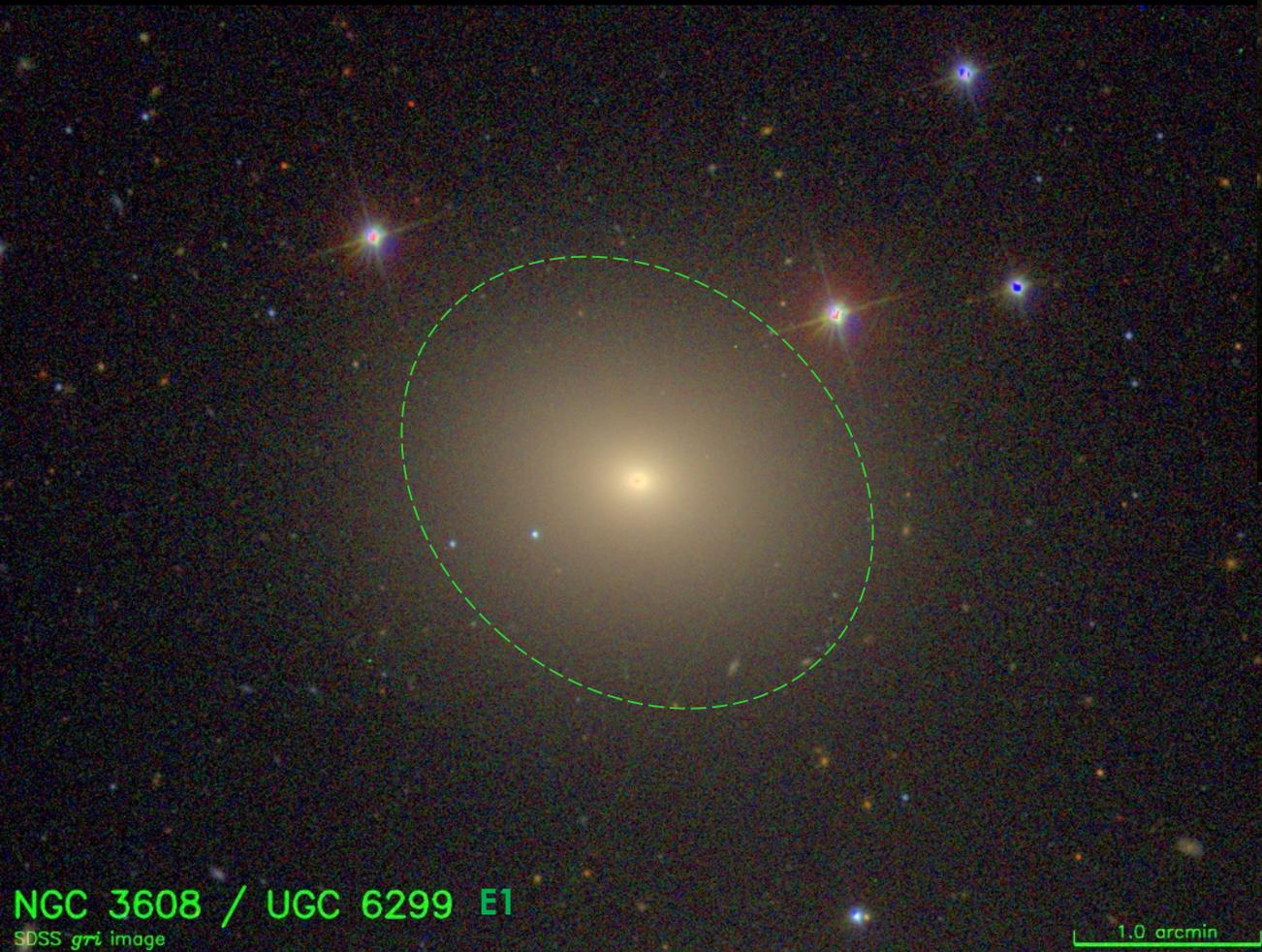


elipsoide triaxial

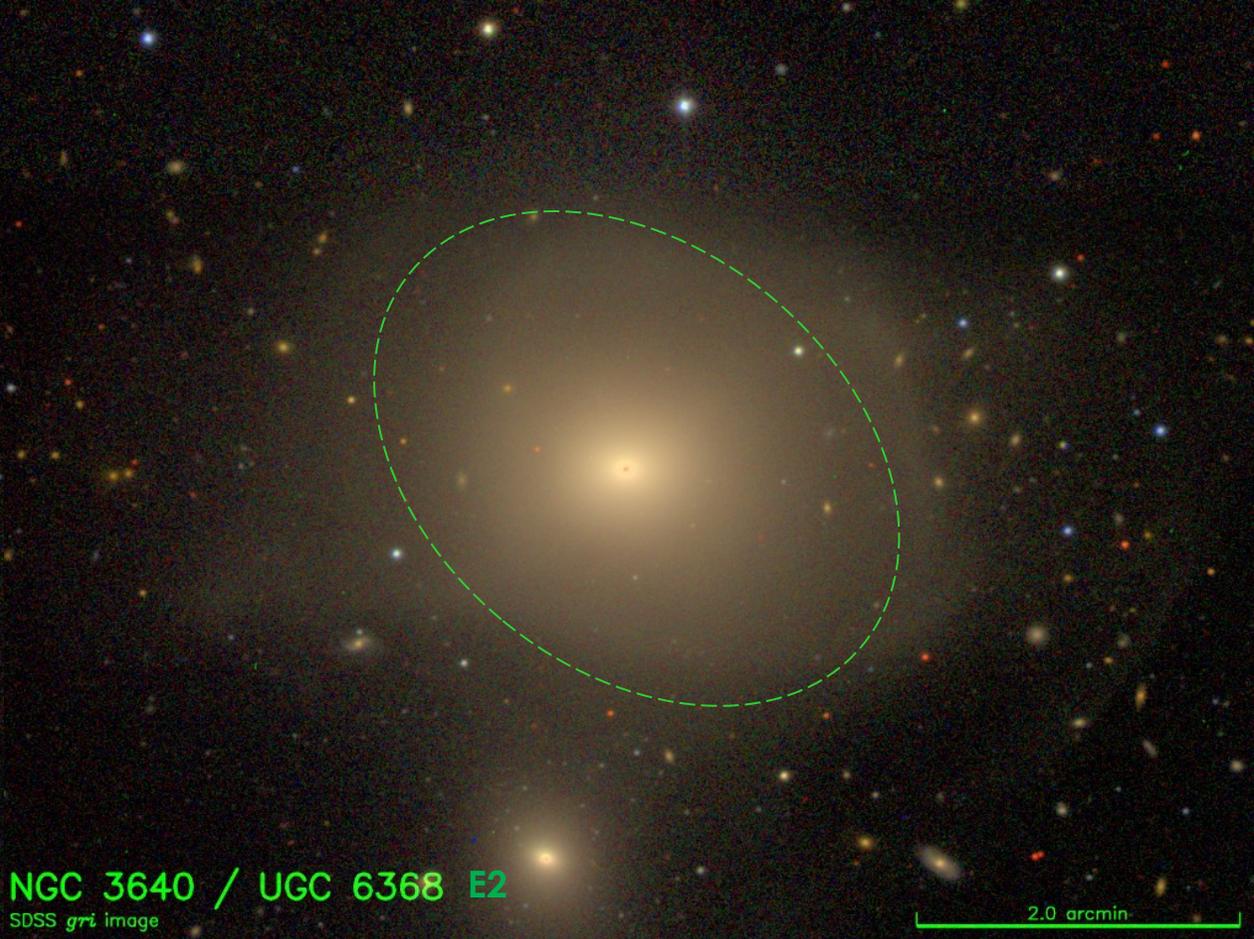
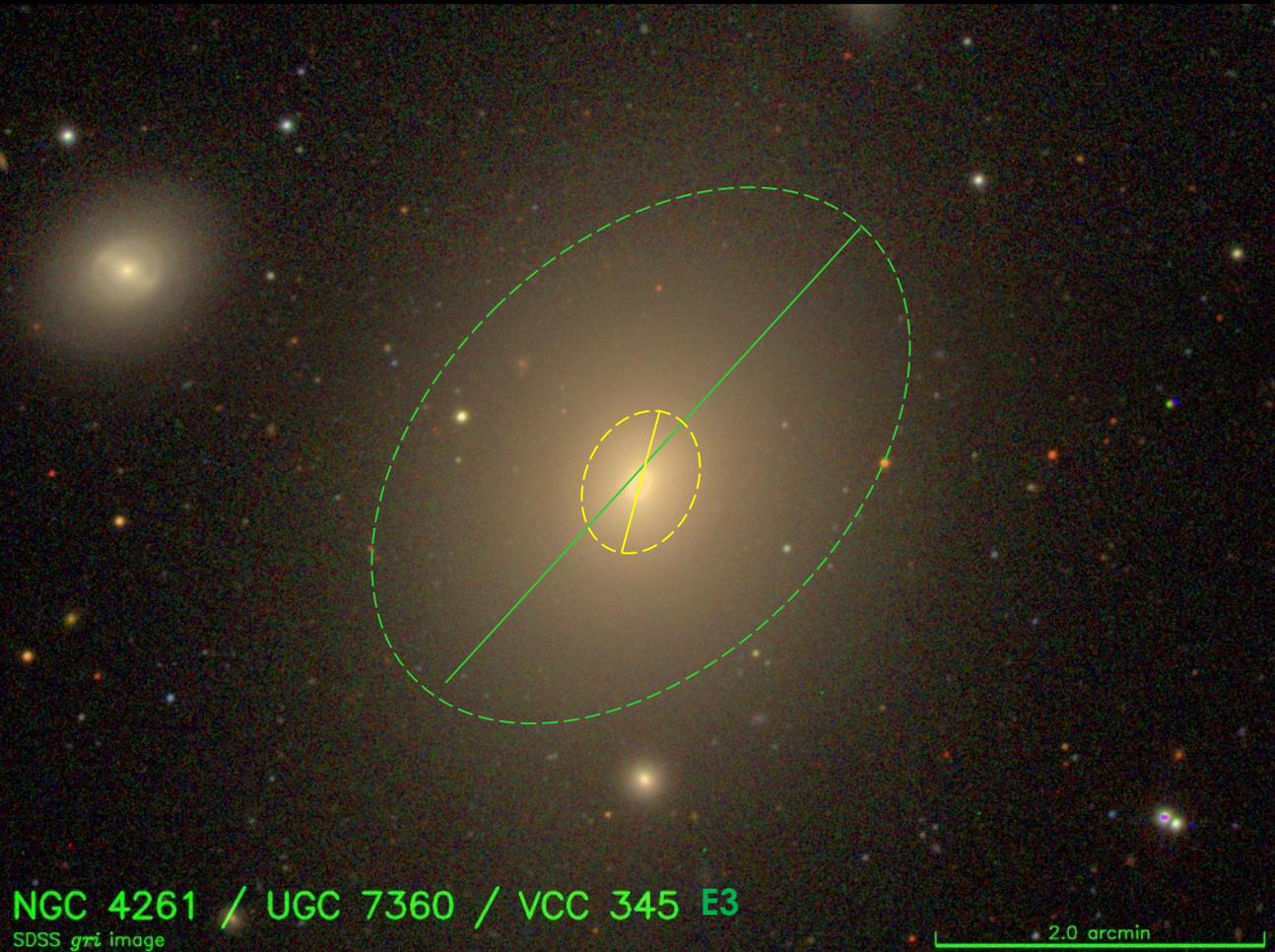
$$a > b > c$$

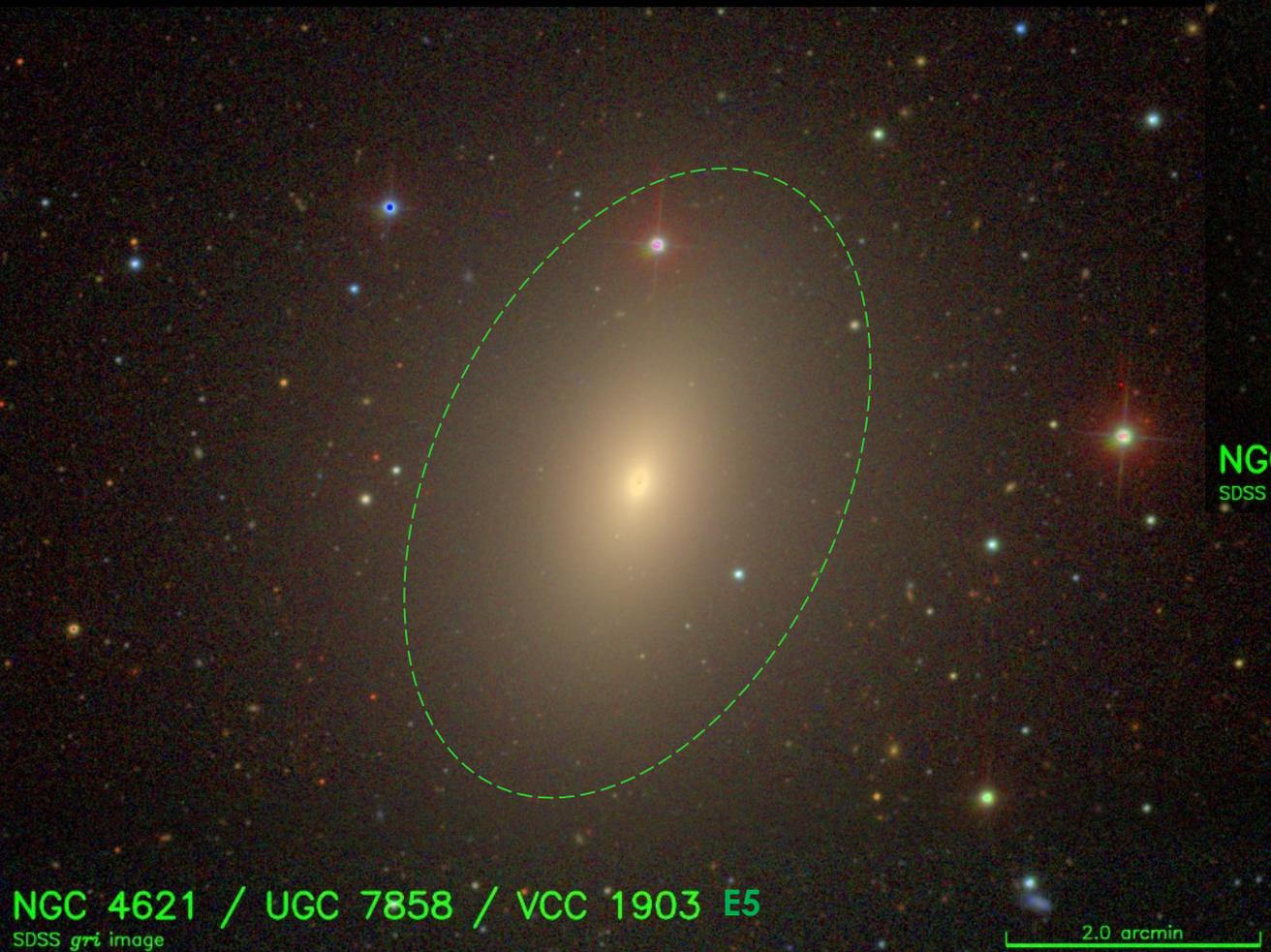
Como determinar a
forma real observando
apenas a forma
aparente ?

Objetos do Revised Shapley Ames Catalog com imagens do SDSS



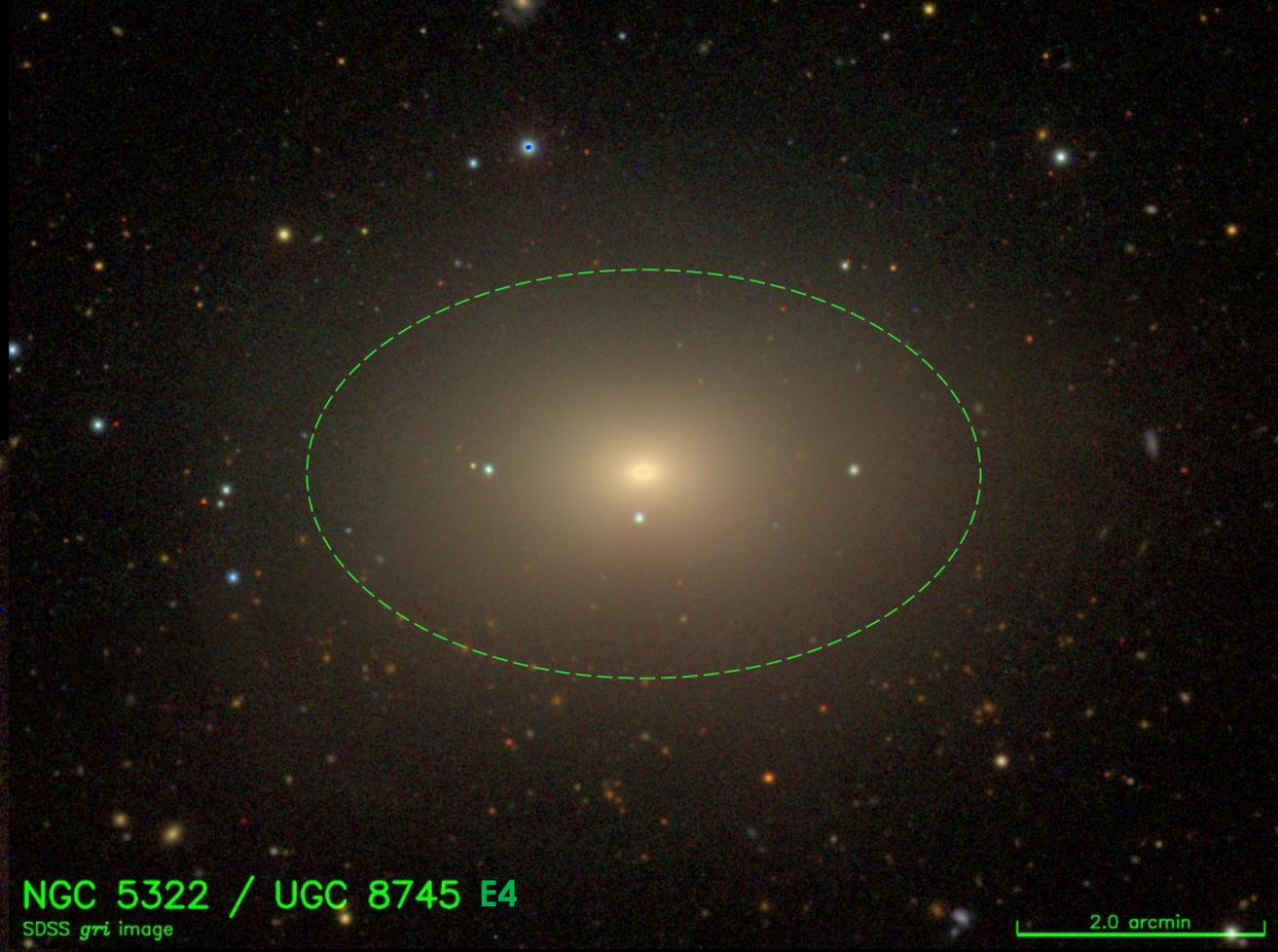
<http://cosmo.nyu.edu/hogg/rc3/>





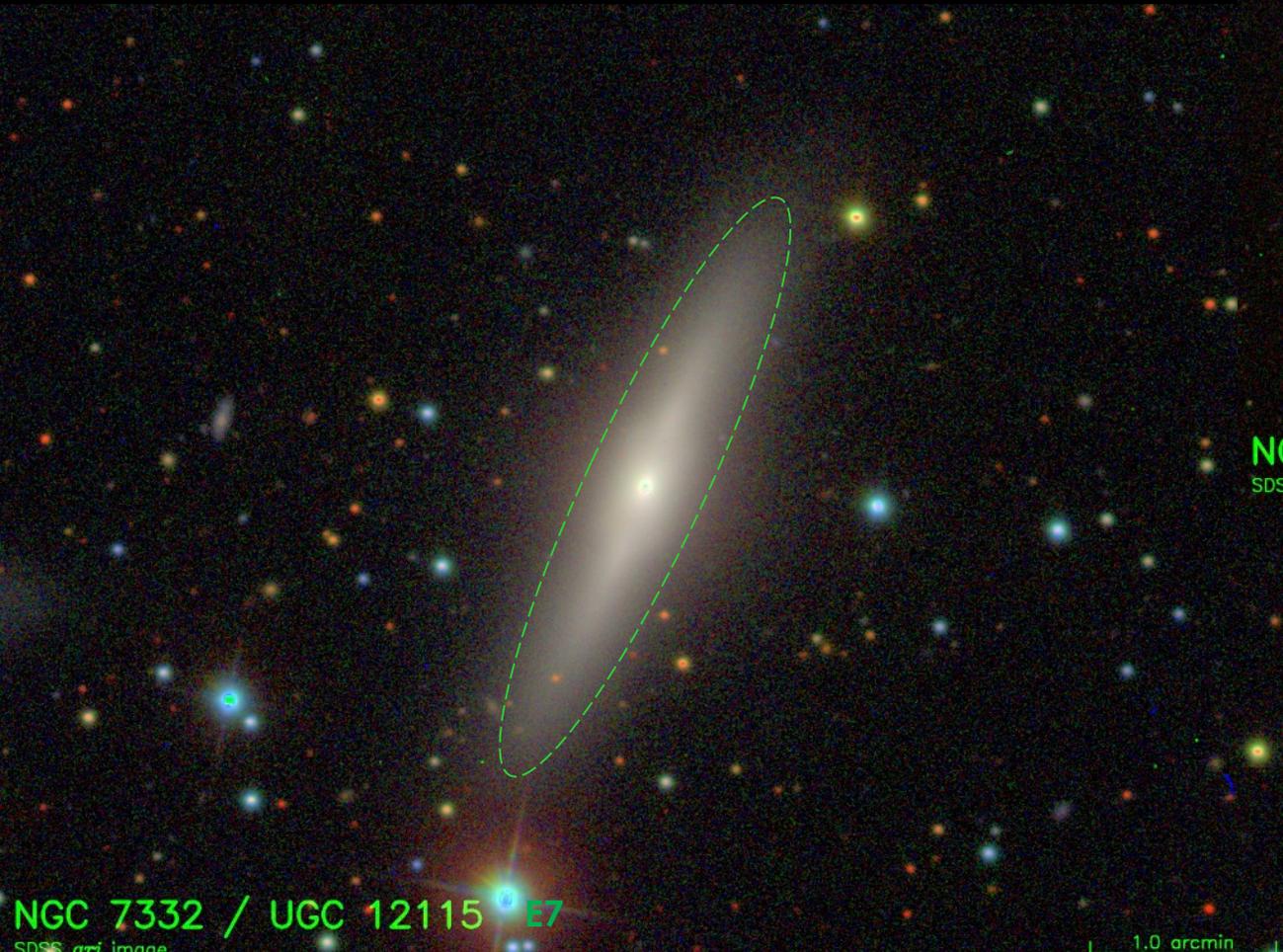
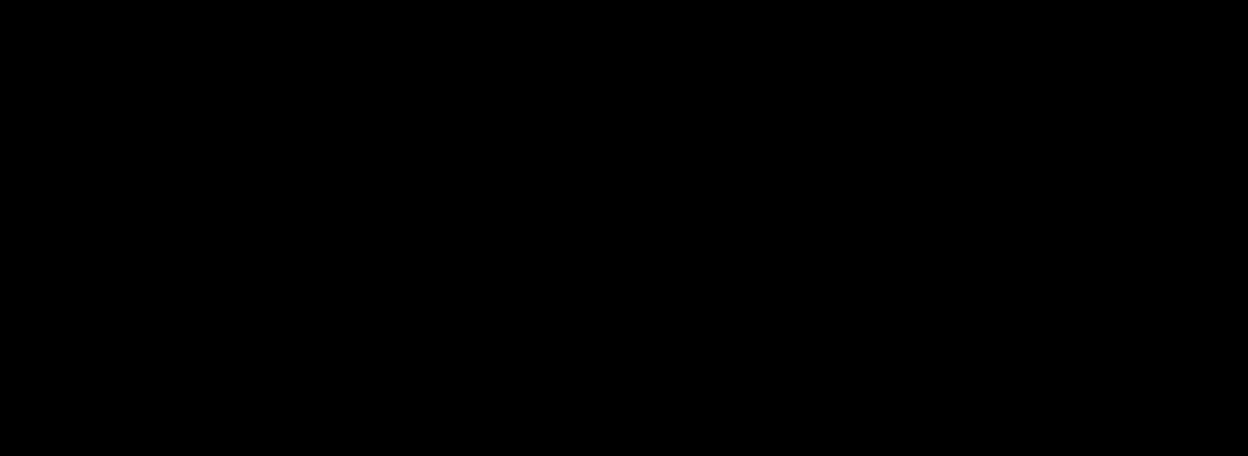
NGC 4621 / UGC 7858 / VCC 1903 E5
SDSS *gri* image

2.0 arcmin



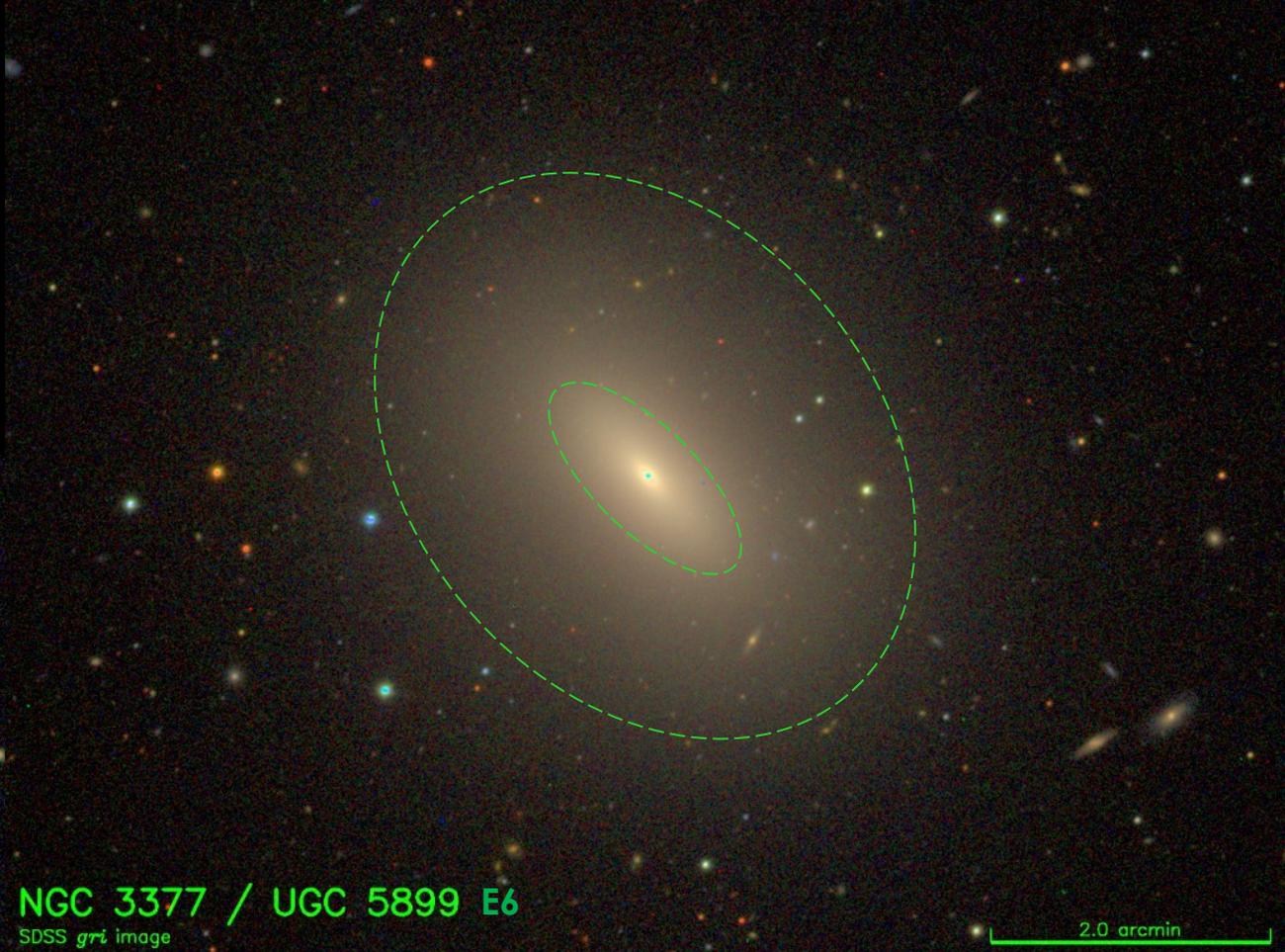
NGC 5322 / UGC 8745 E4
SDSS *gri* image

2.0 arcmin



NGC 7332 / UGC 12115 E7
SDSS *gri* image

1.0 arcmin



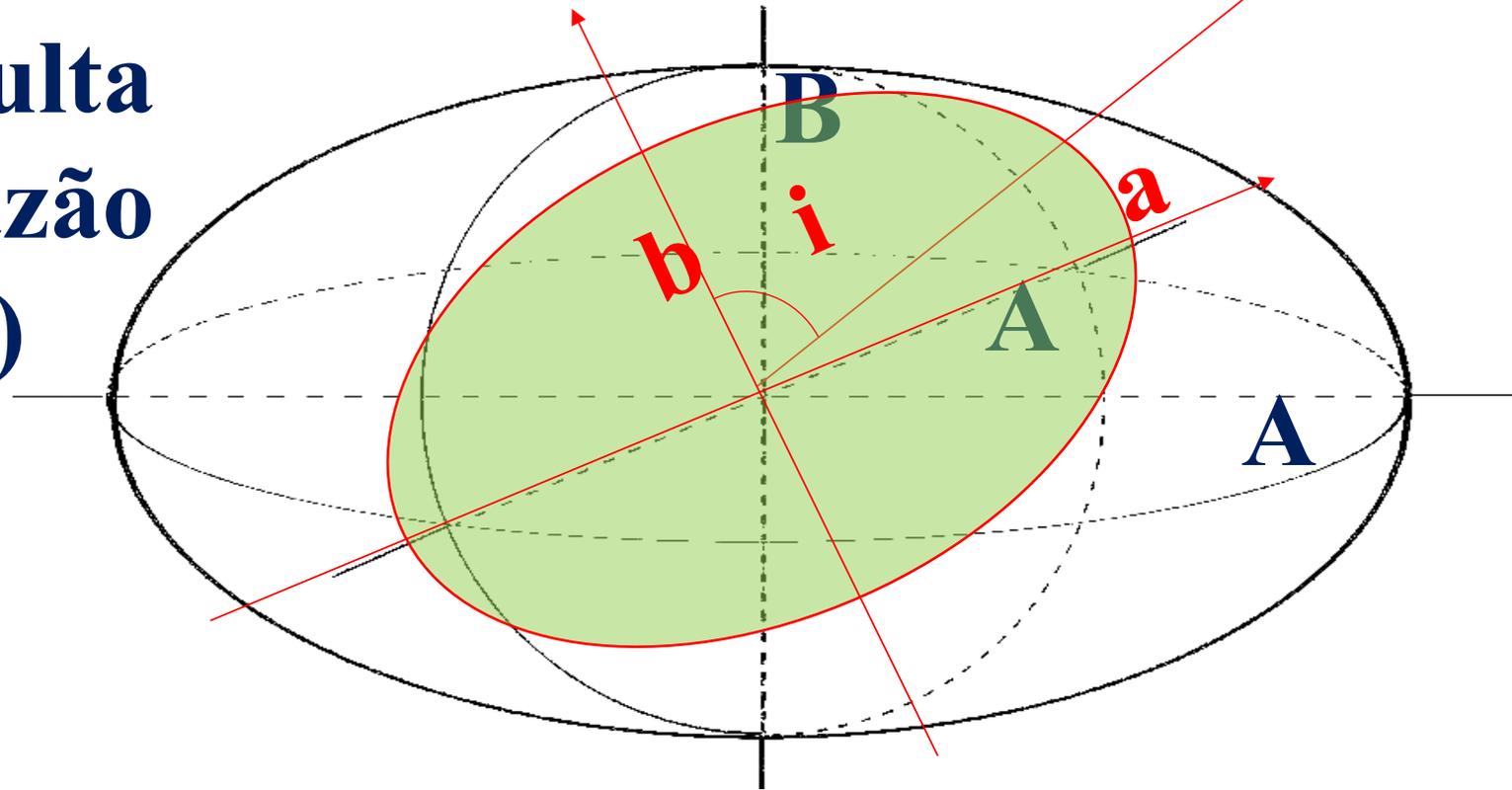
NGC 3377 / UGC 5899 E6
SDSS *gri* image

2.0 arcmin

A projeção de um esferoide oblato de razão axial real $\xi=B/A$ resulta em uma elipse de razão axial aparente ($q=b/a$)

$$q^2 = \xi^2 \text{sen}^2 i + \text{cos}^2 i$$

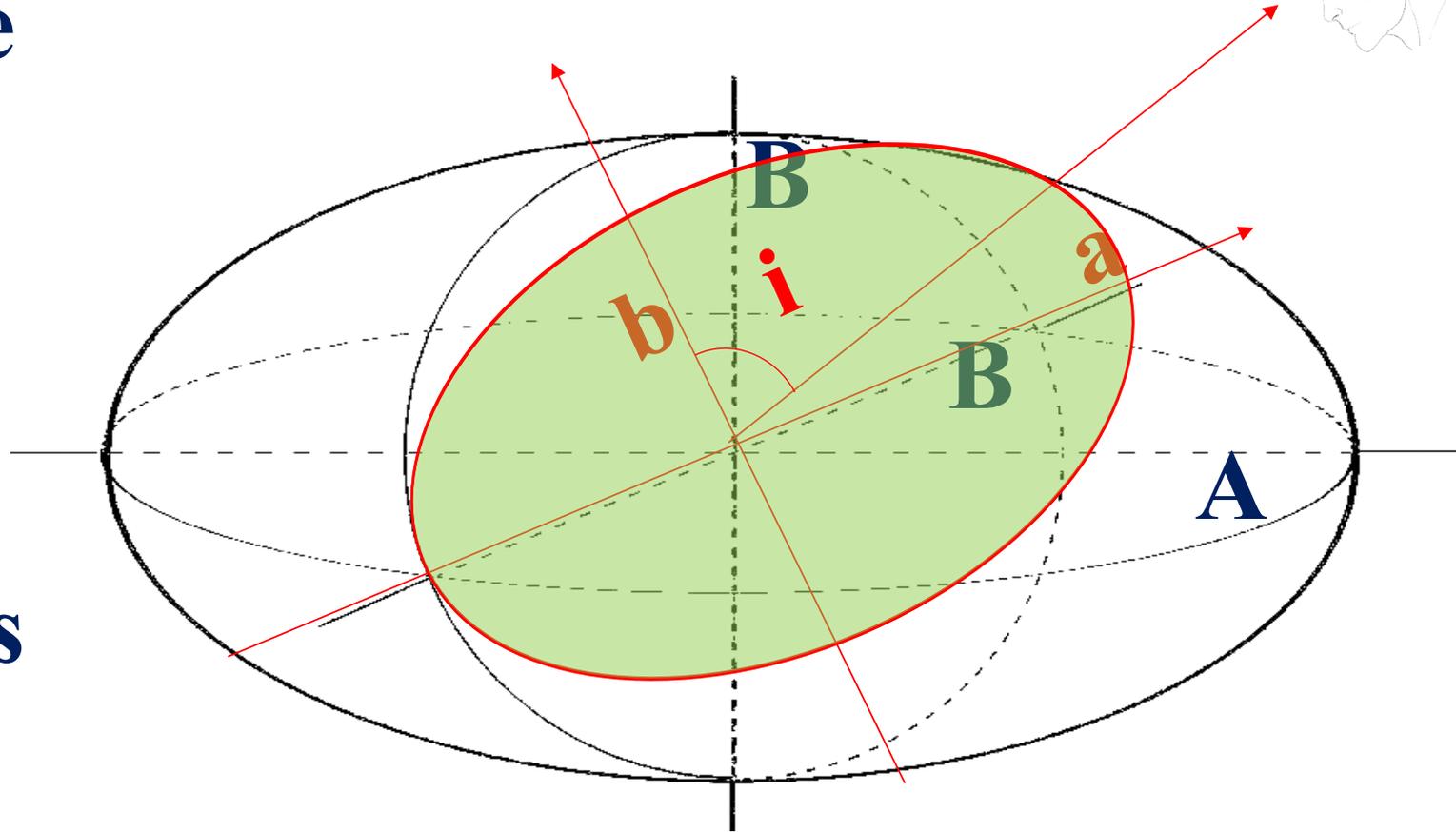
onde i é o ângulo de inclinação em relação ao observador.



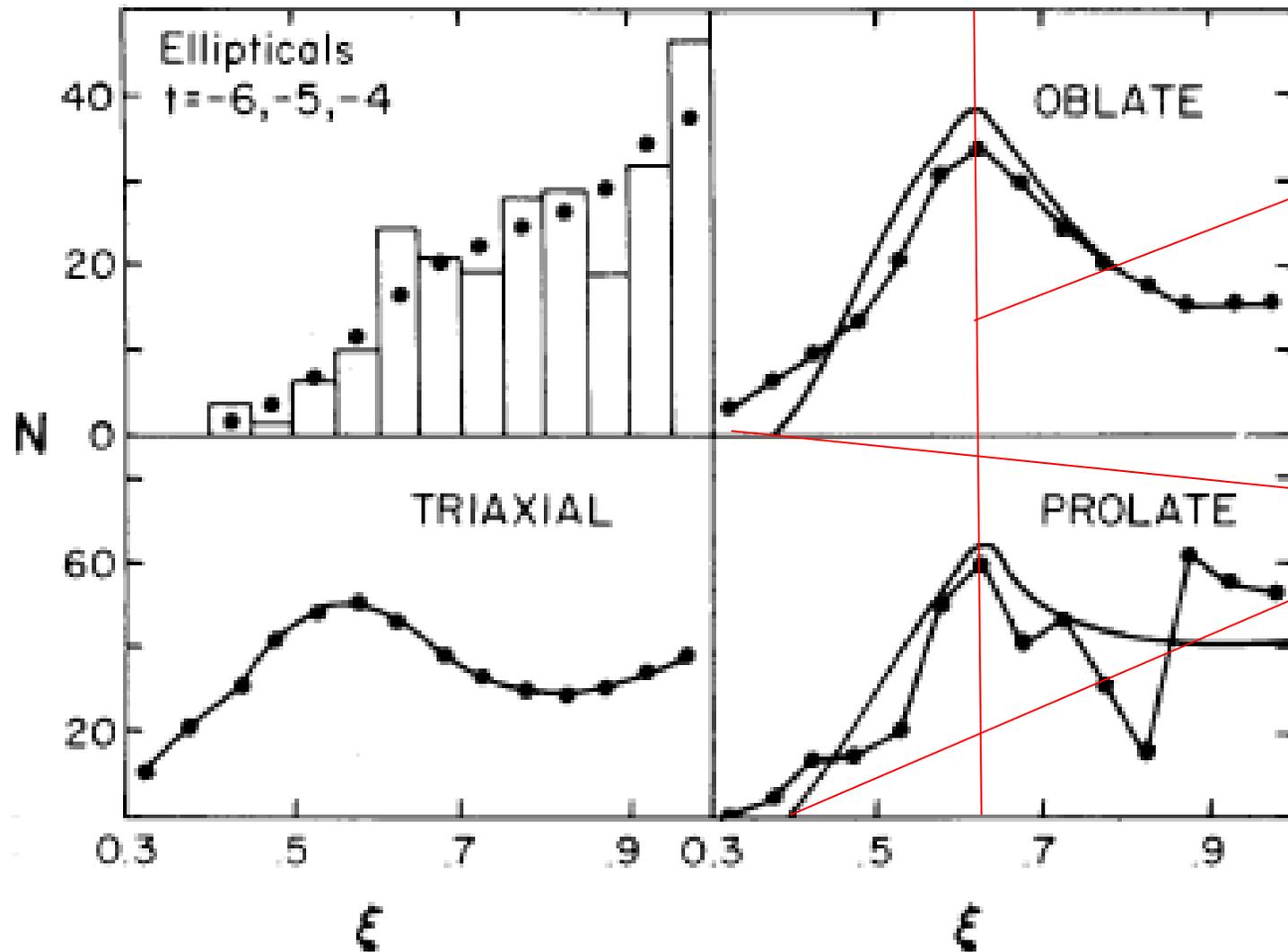
Caso seja um elipsoide prolato a relação deve ser

$$1/q^2 = \xi^2 \sin^2 i + \cos^2 i$$

Para a dedução destas relações veja o livro Galactic Astronomy de Mihalas & Binney (1978)

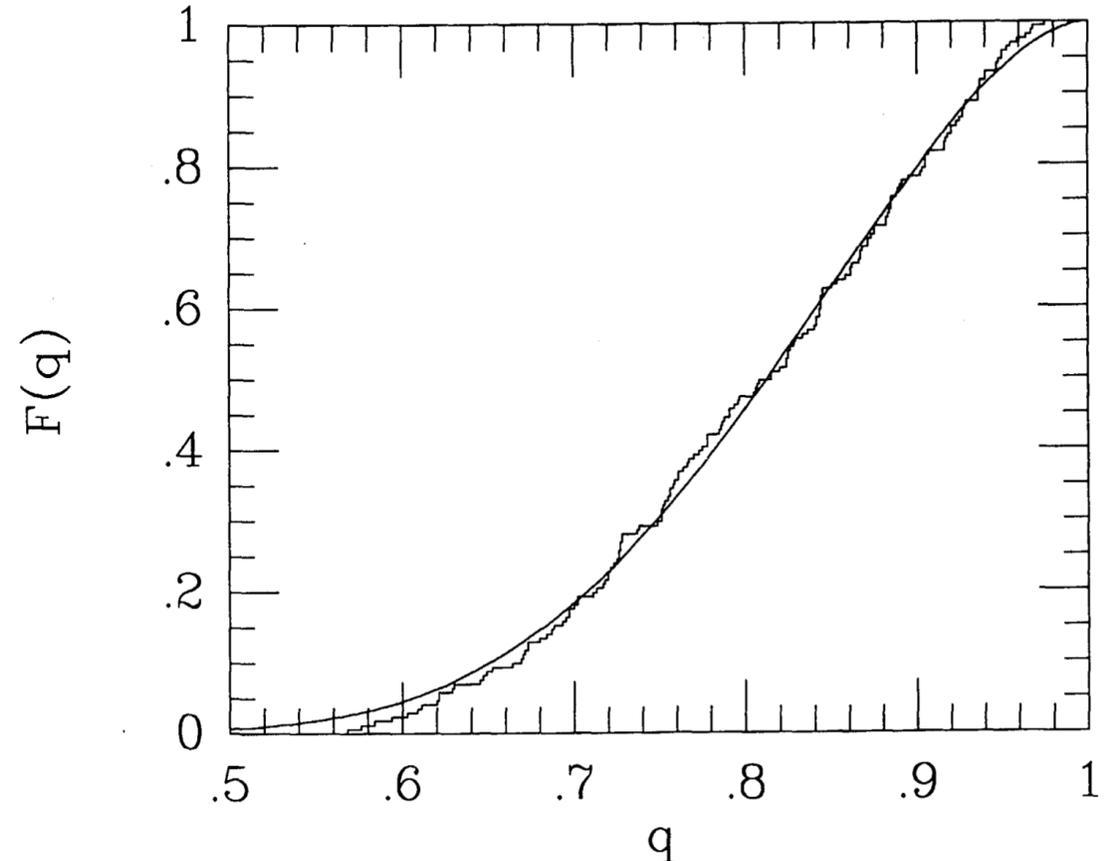
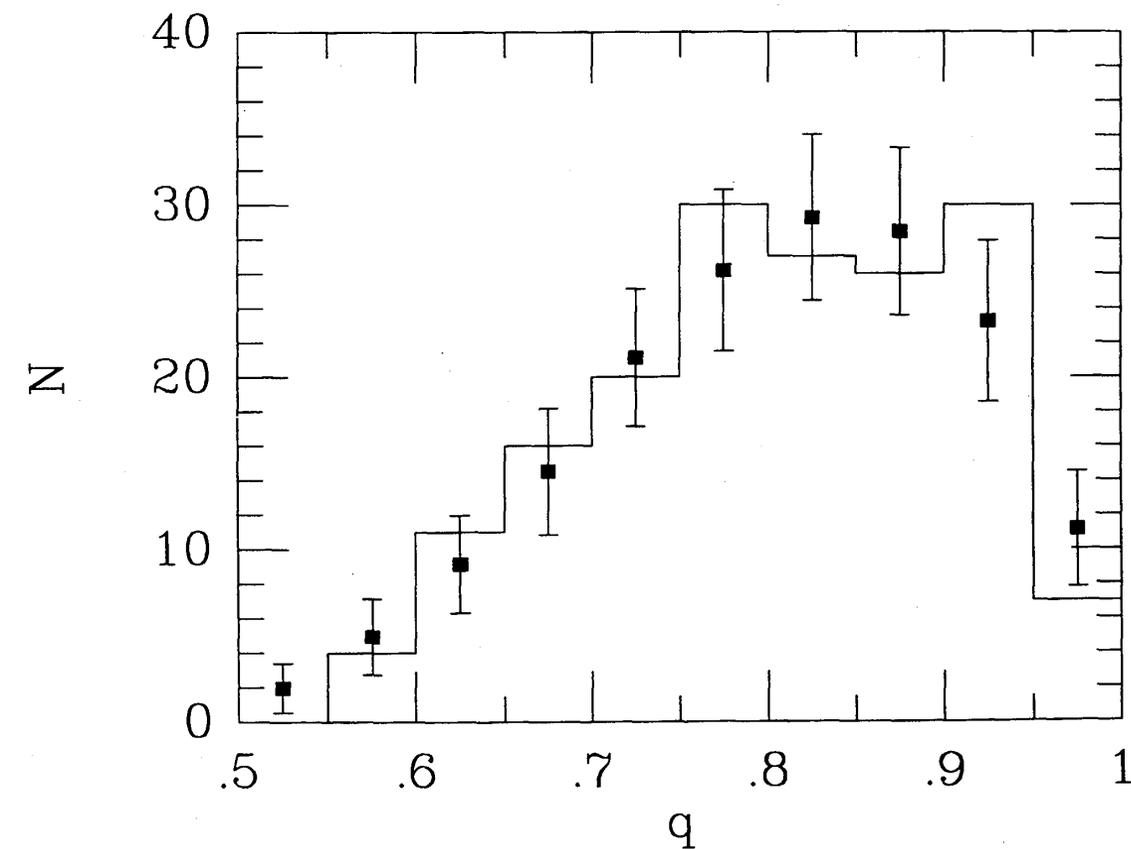


Estatisticamente as galáxias elípticas podem ser descritas por um elipsoide de razão axial intrínseca

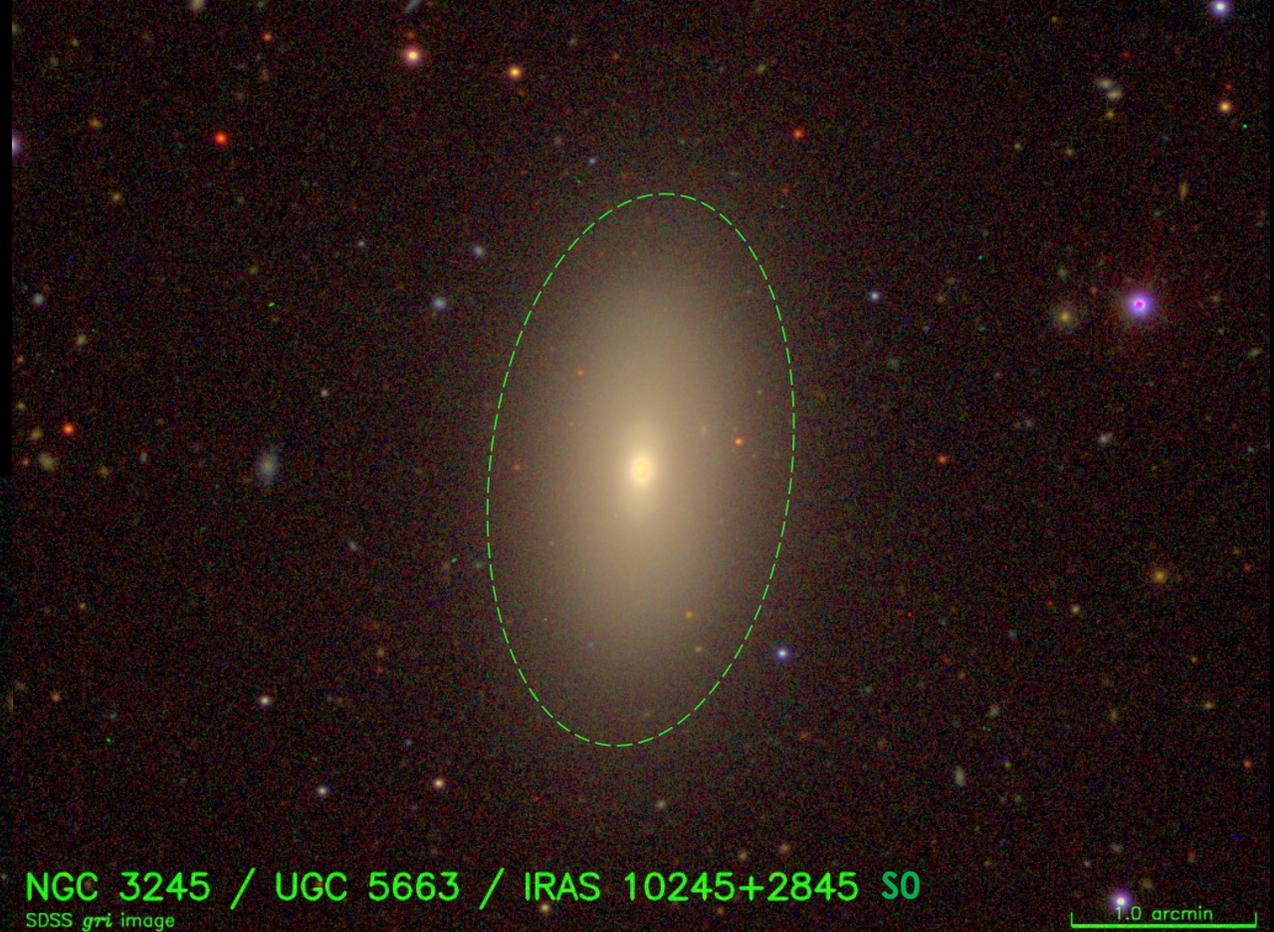
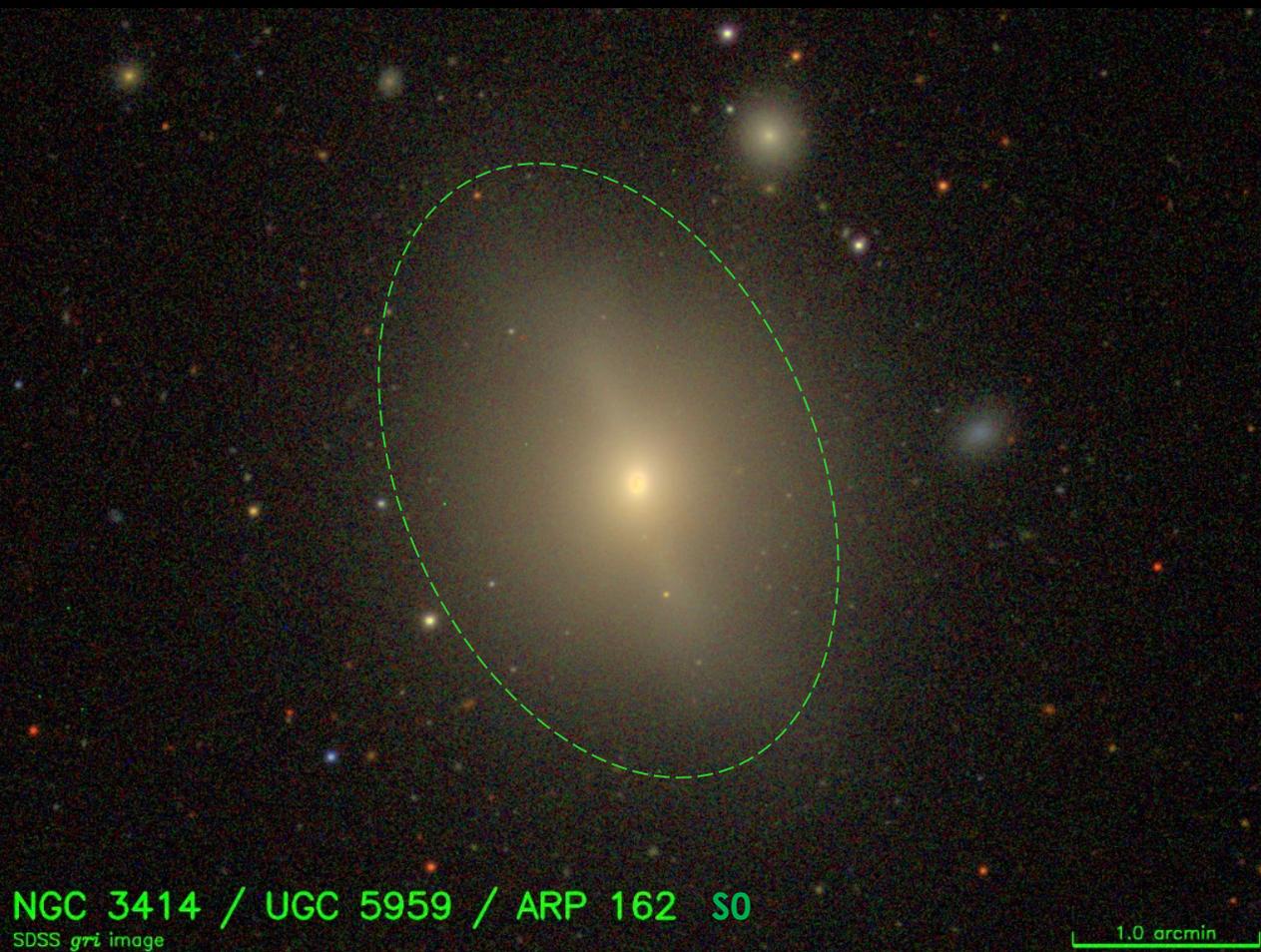


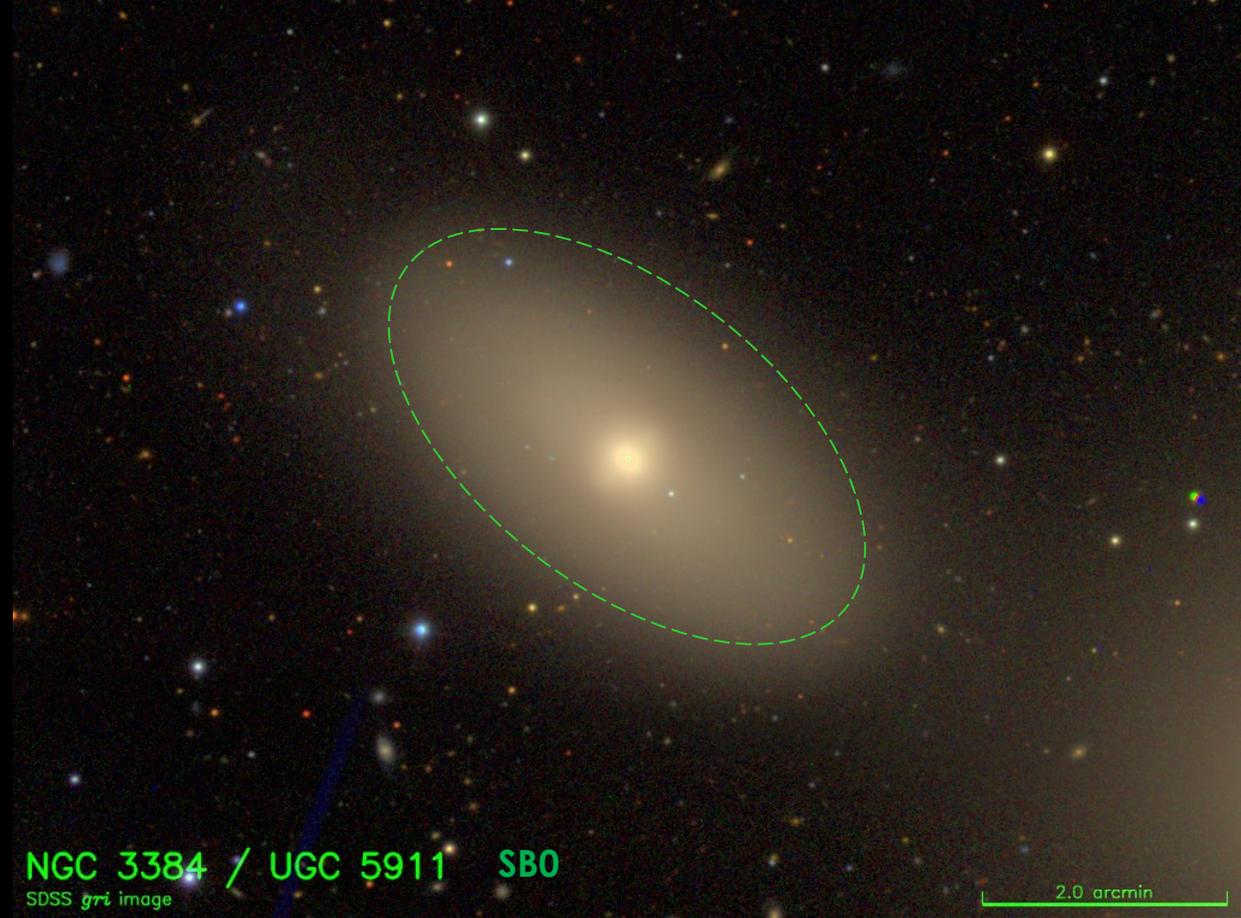
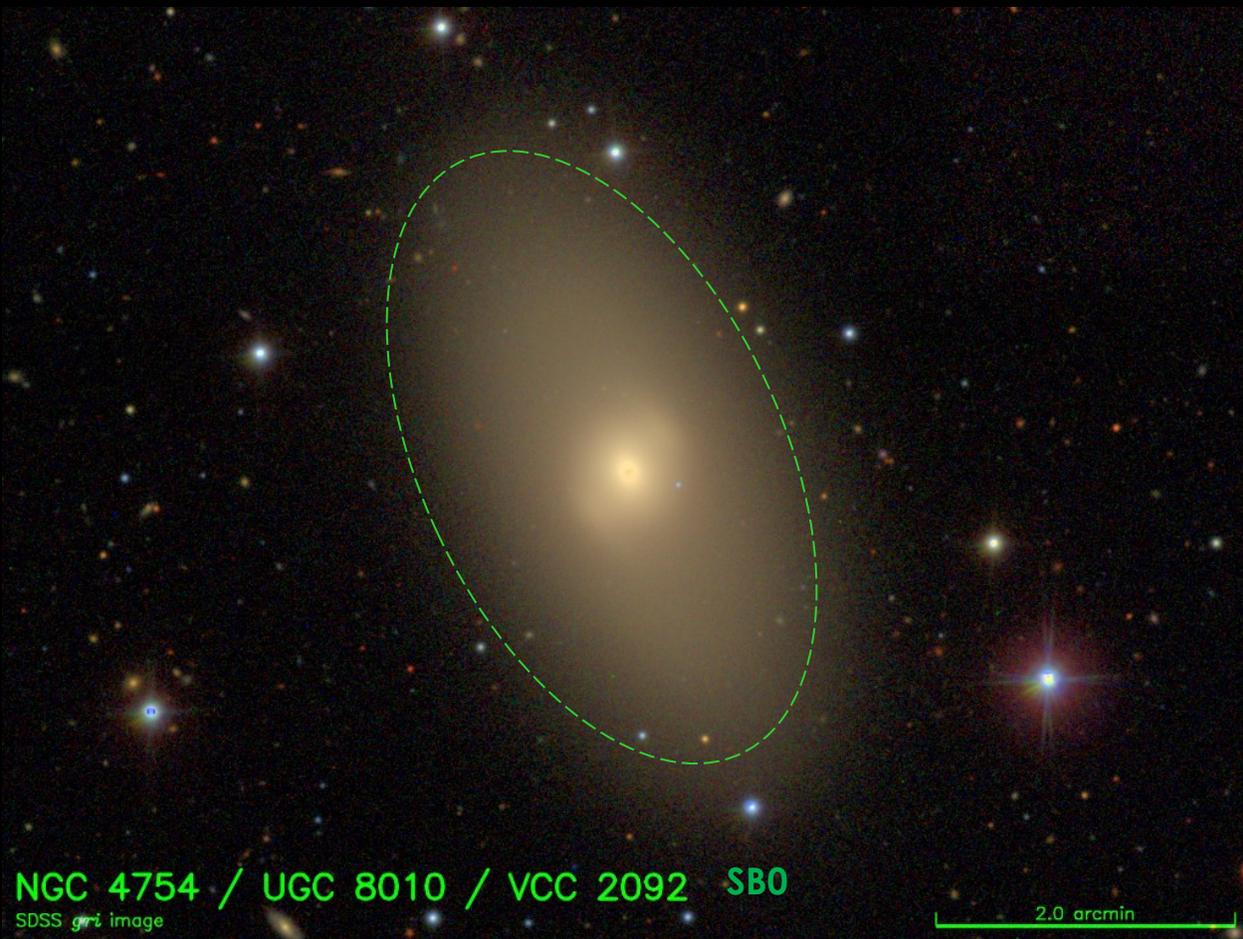
**$\xi \cong 0,6$ (E4).
 Observe como a proporção de objetos muito achatados é quase nula para $\xi < 0,3$.
 (Binney & de Vaucouleurs, 1981)**

Utilizando uma amostra de 171 galáxias elípticas B. S. Ryden (1992) concluiu que a forma das galáxias elípticas talvez seja melhor descrita por um elipsoide triaxial com razões axiais 1:0,98:0,69.



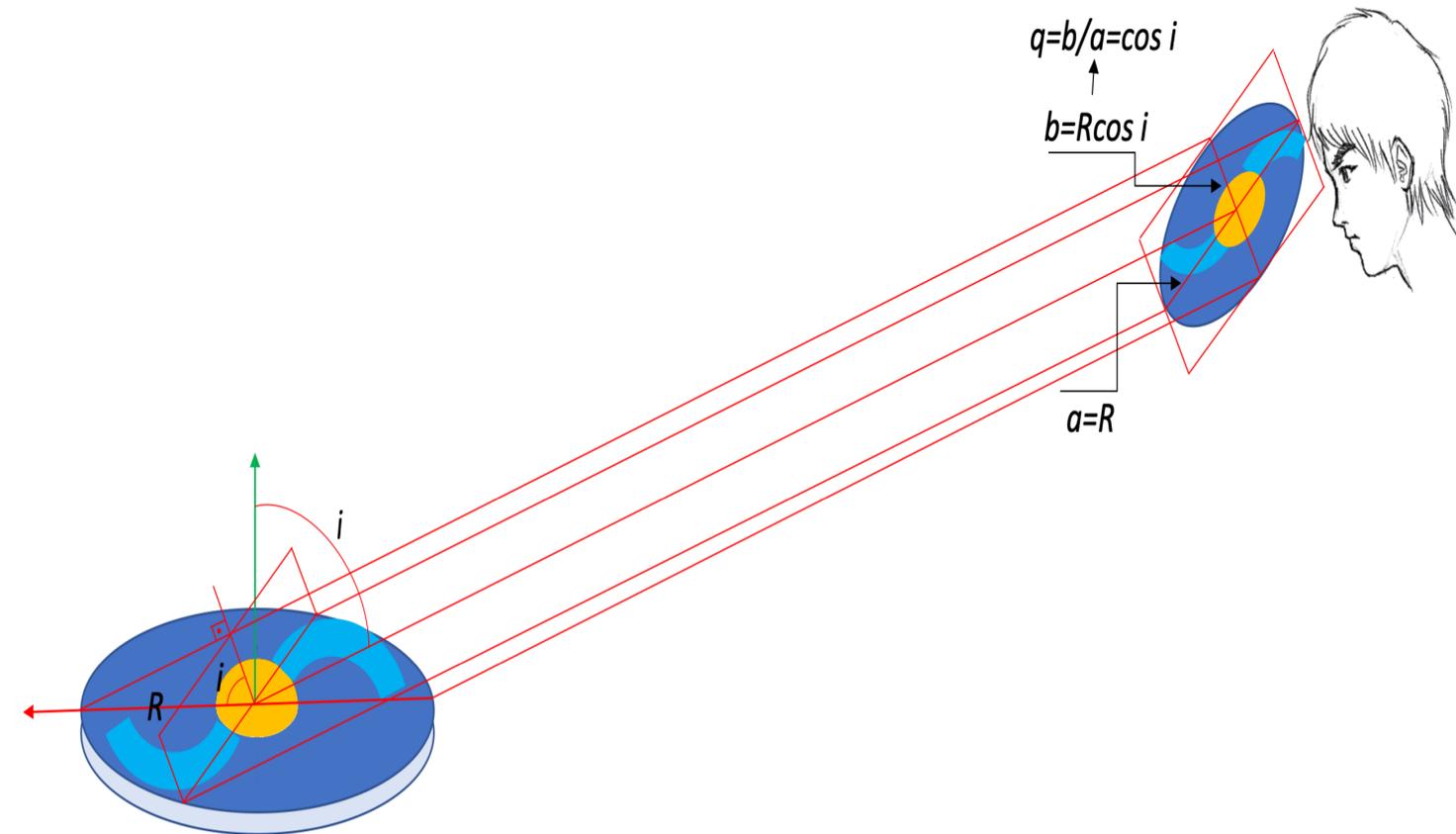
Galáxias Lenticulares





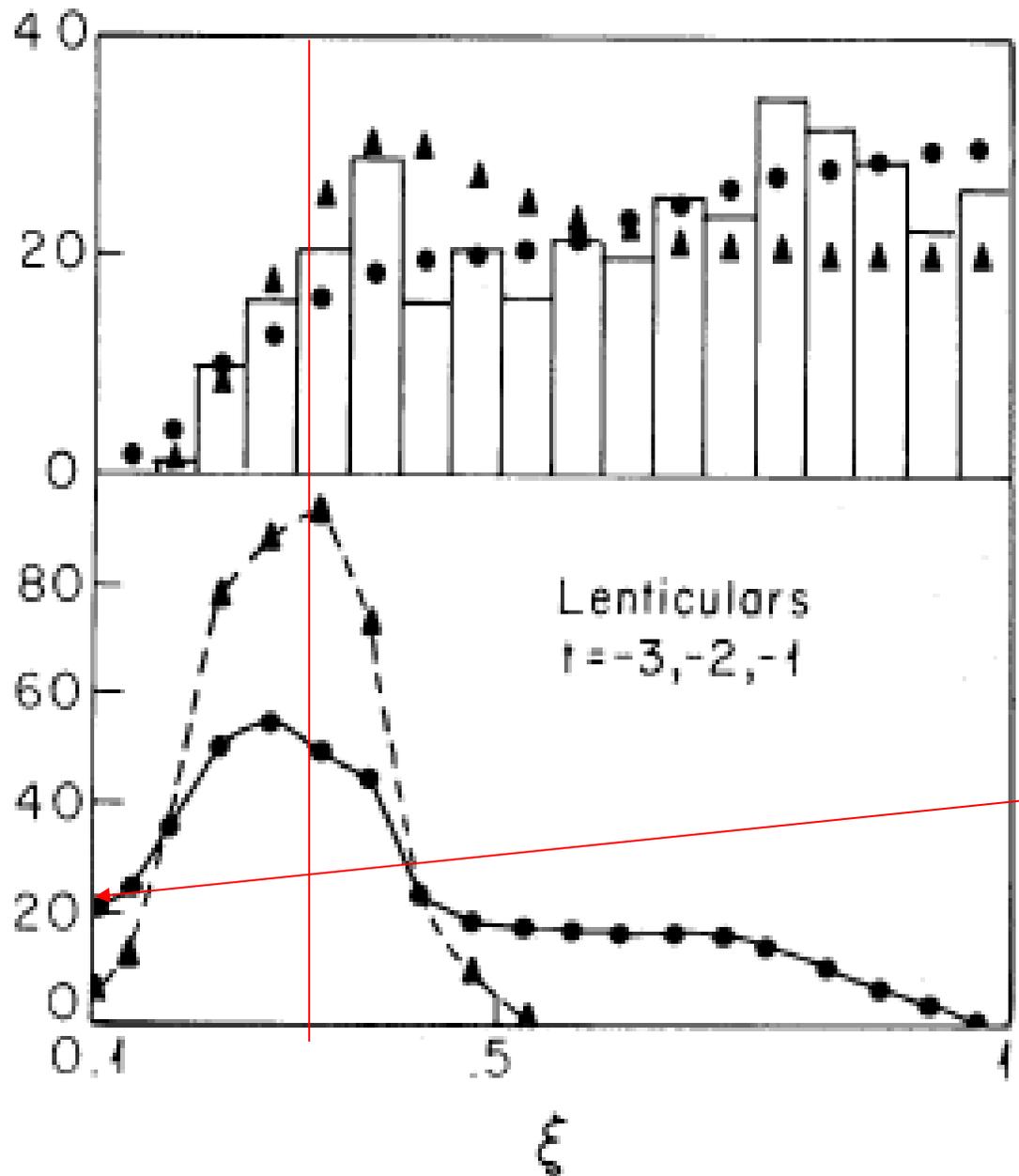
Nas lenticulares e espirais, com disco fino, a razão axial observada ($q=b/a$) obedece a relação

$$q^2 = \xi^2 \text{sen}^2 i + \text{cos}^2 i$$



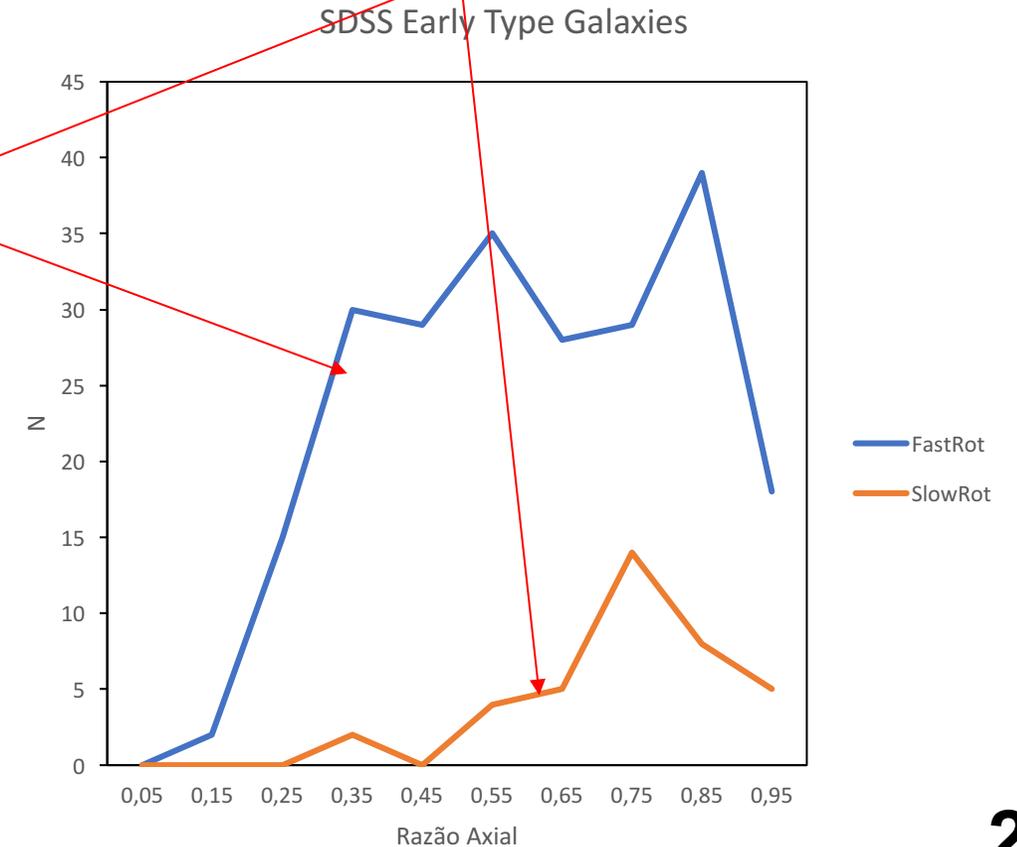
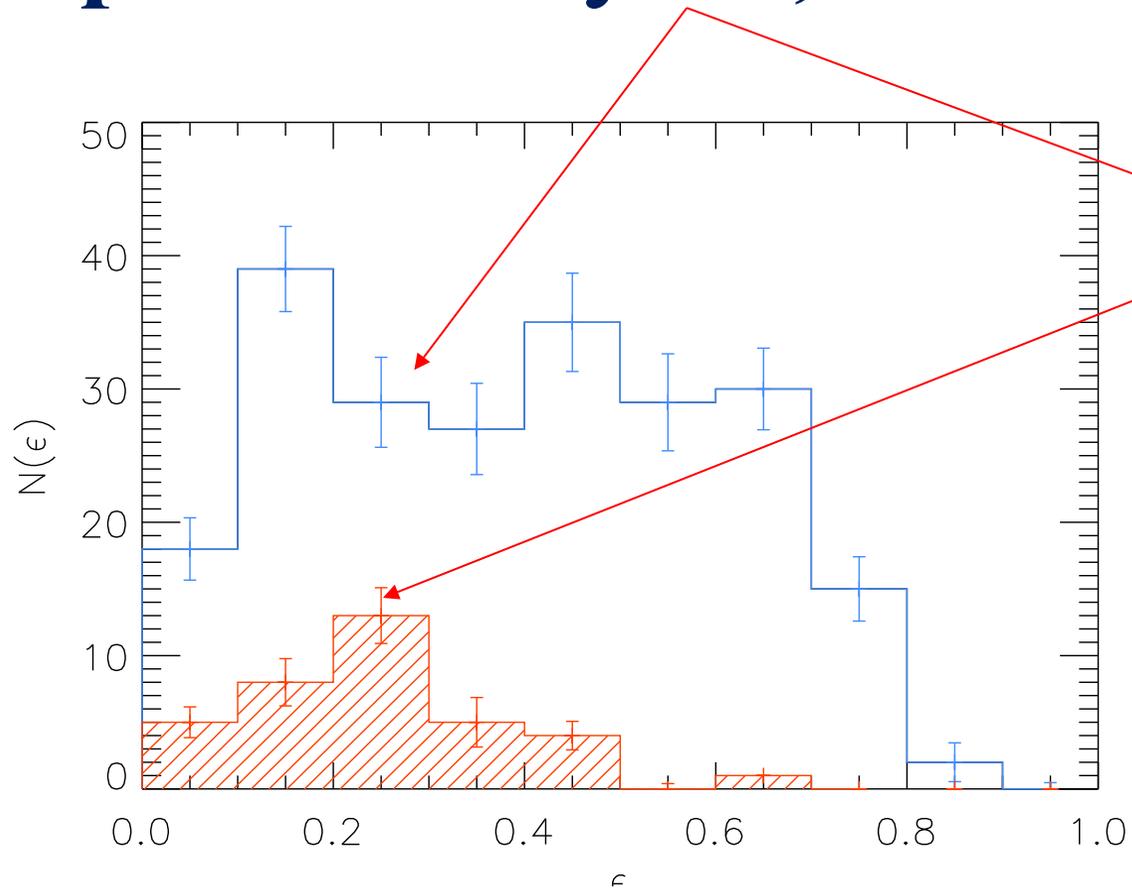
Sendo i é o ângulo de inclinação e como a espessura relativa do disco $H \ll \xi R$ temos que

$$q \cong \text{cos } i$$

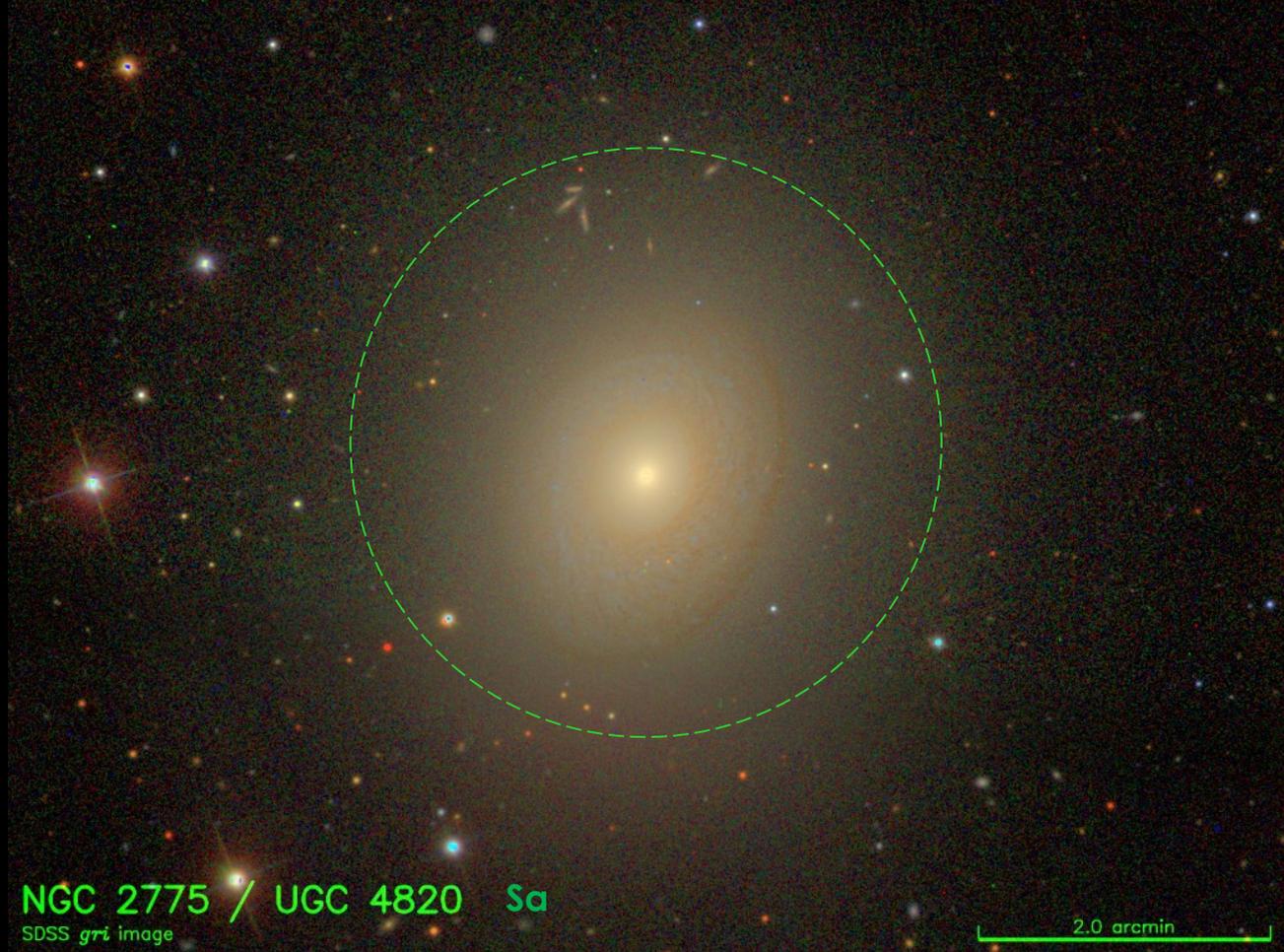
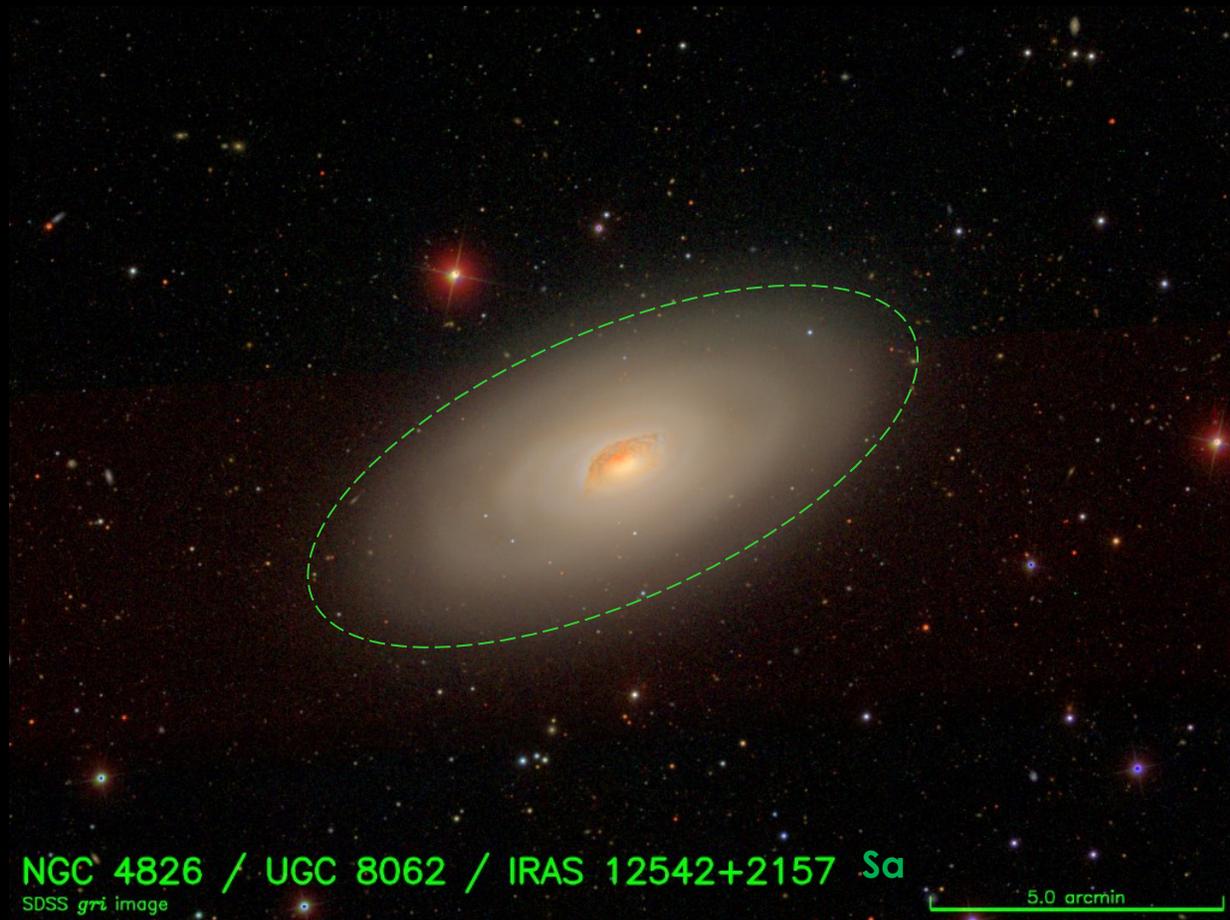


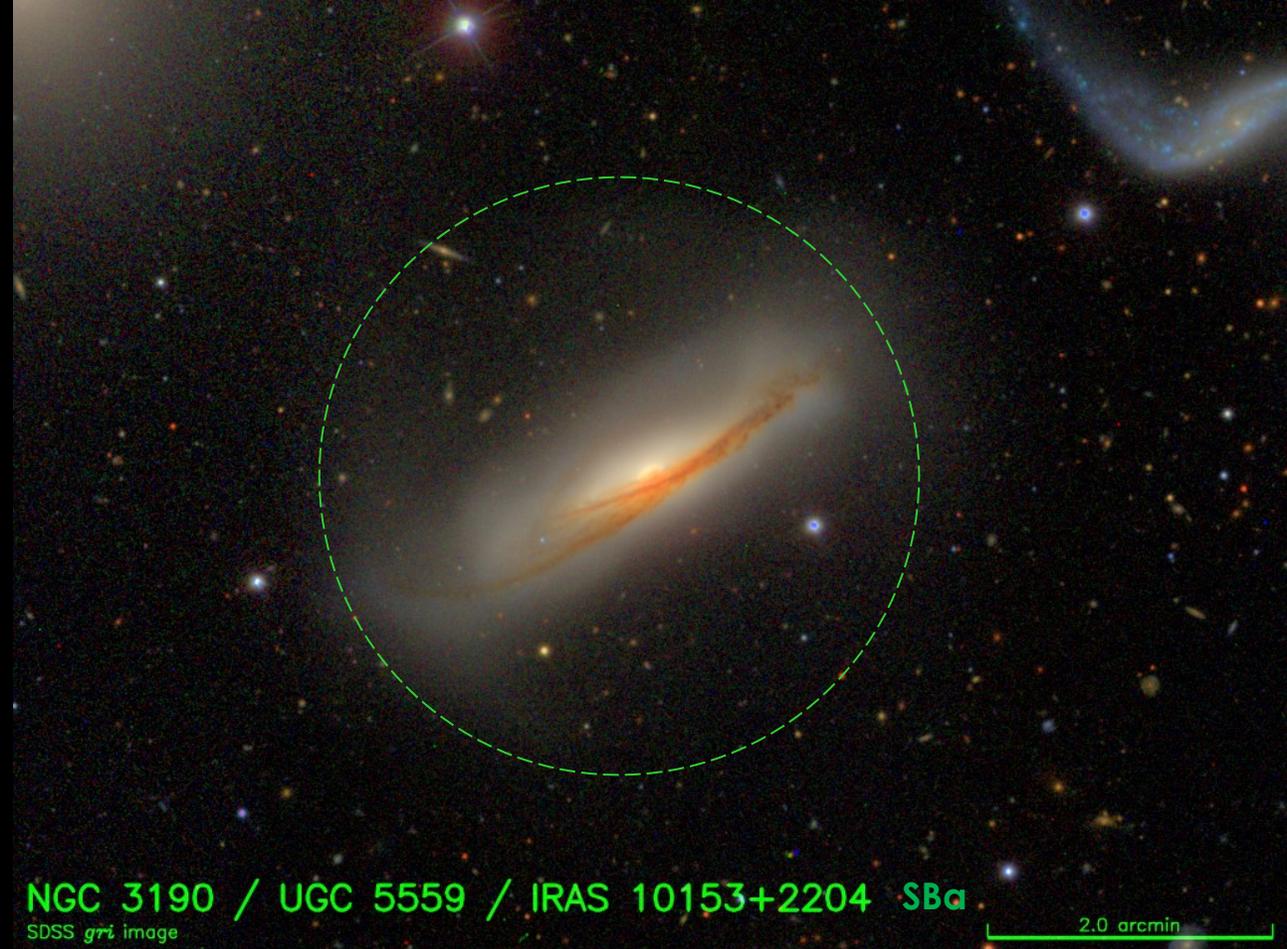
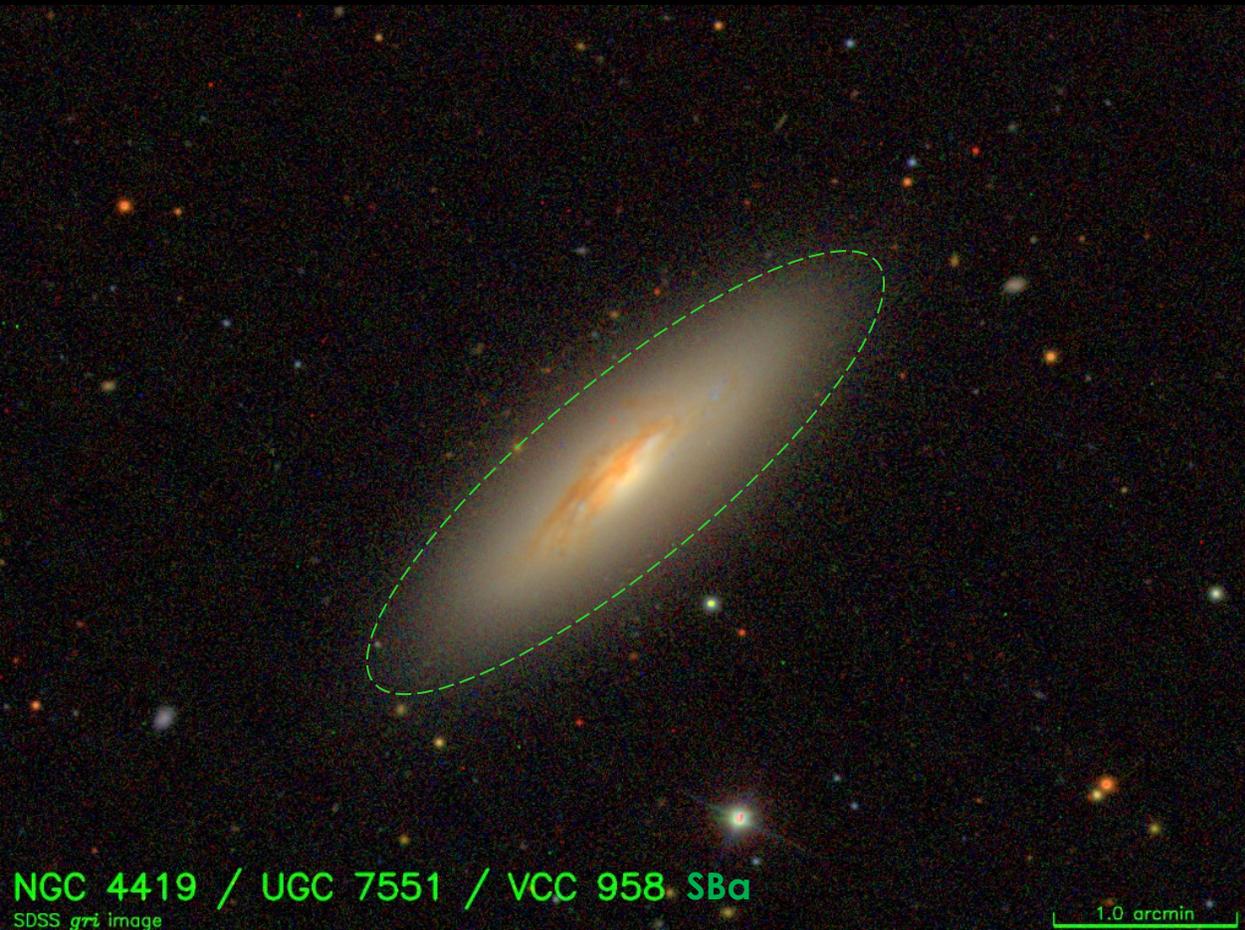
O resultado da análise das galáxias lenticulares indica que a razão axial intrínseca média é $\xi \cong 0,3$ mostrando que devem existir objetos bastante achatados, ainda que em número mais reduzido.

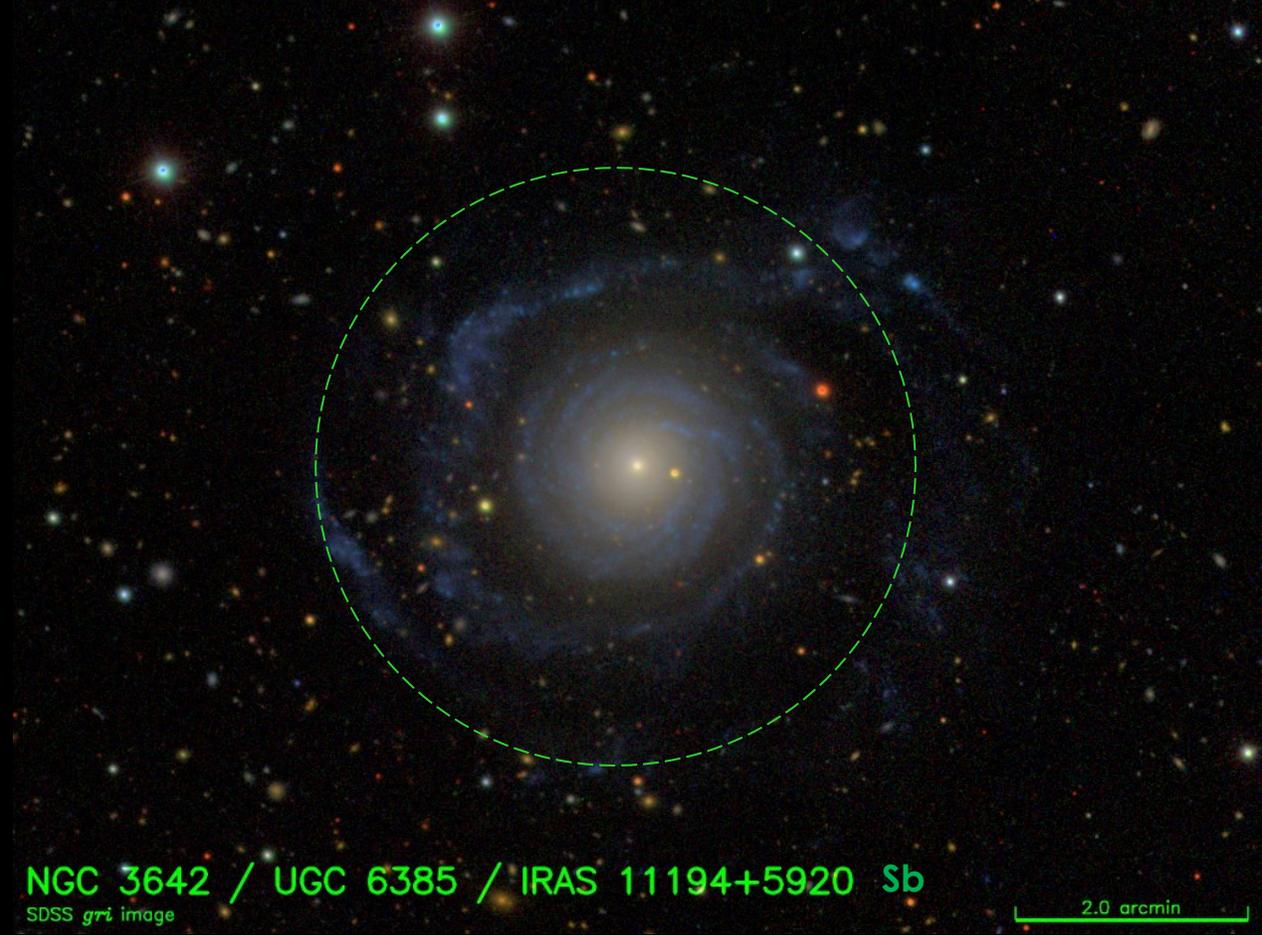
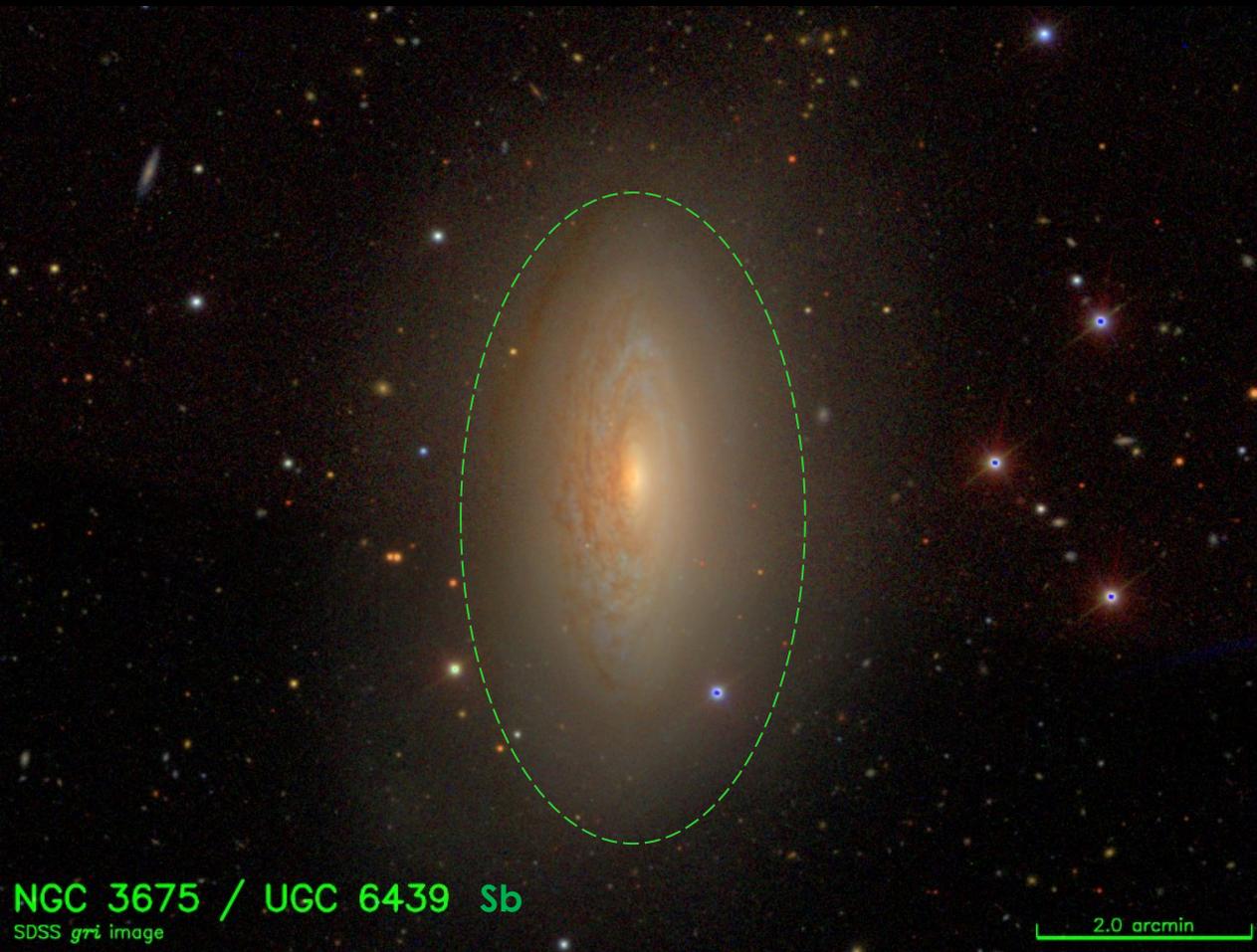
A tendência moderna considera que as elípticas e lenticulares formam uma classe conhecida como galáxias de tipo jovem a qual se divide entre rotatores rápidos com $\xi \cong 0,25$ e rotatores lentos $\xi \cong 0,63$.

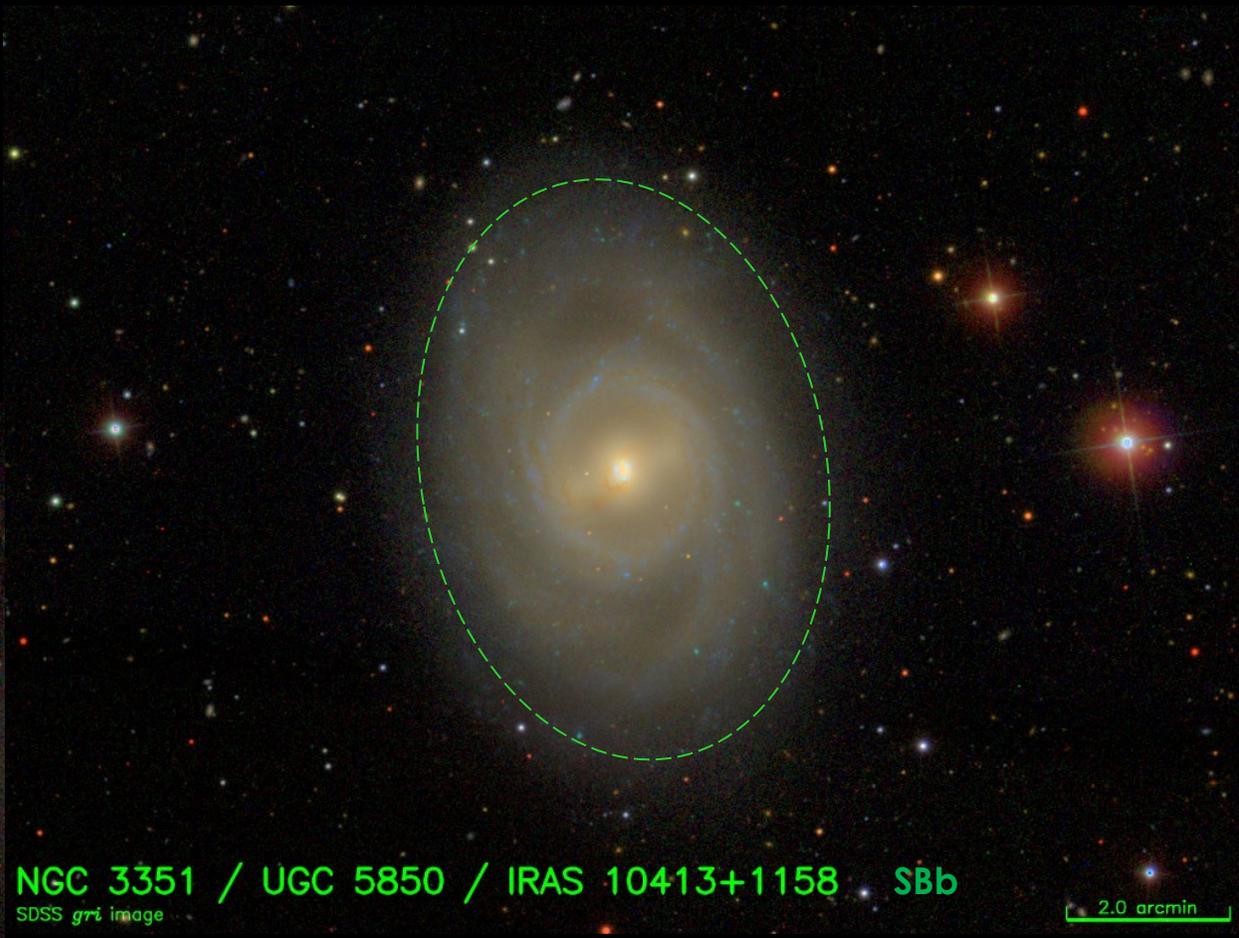
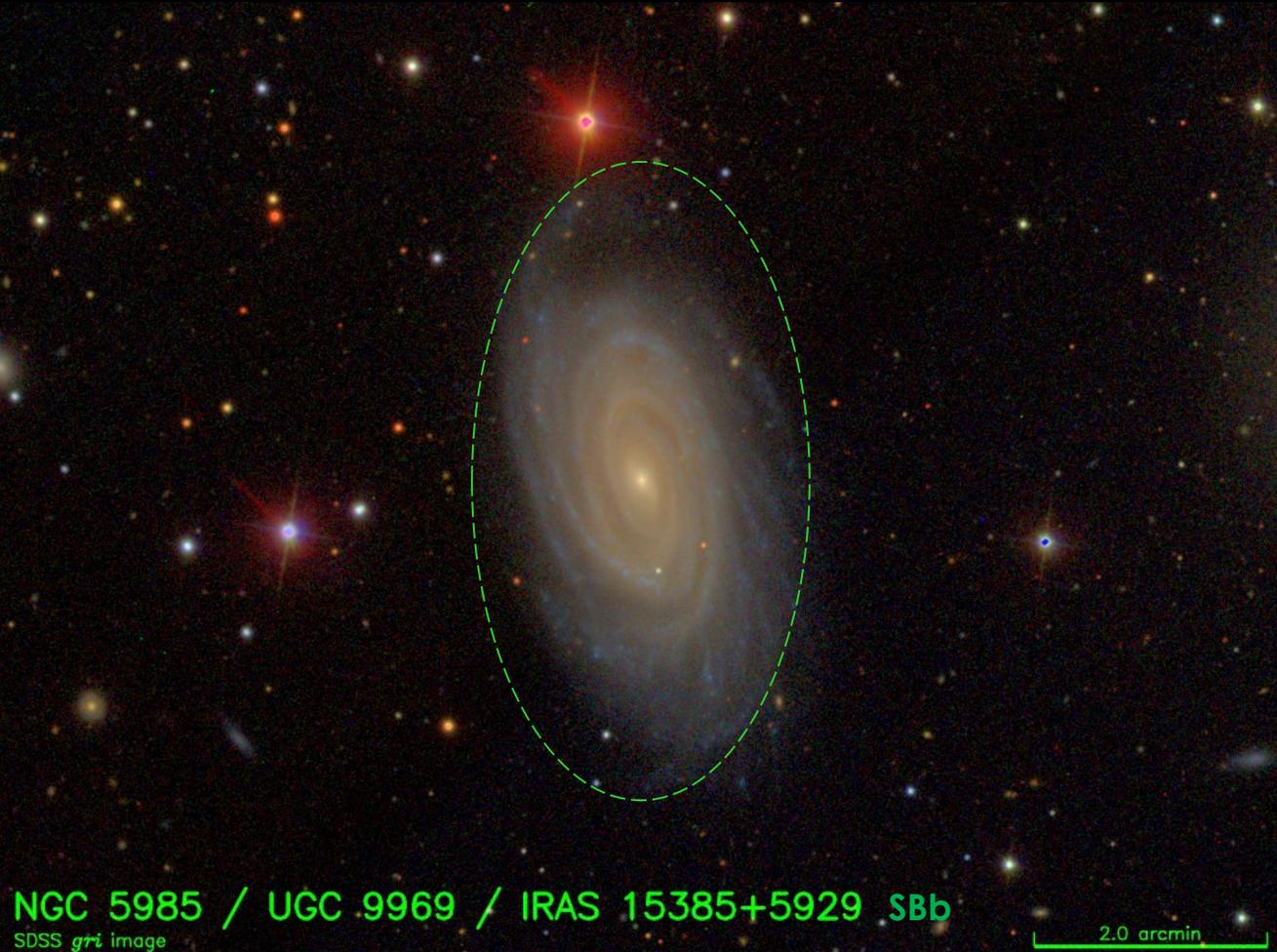


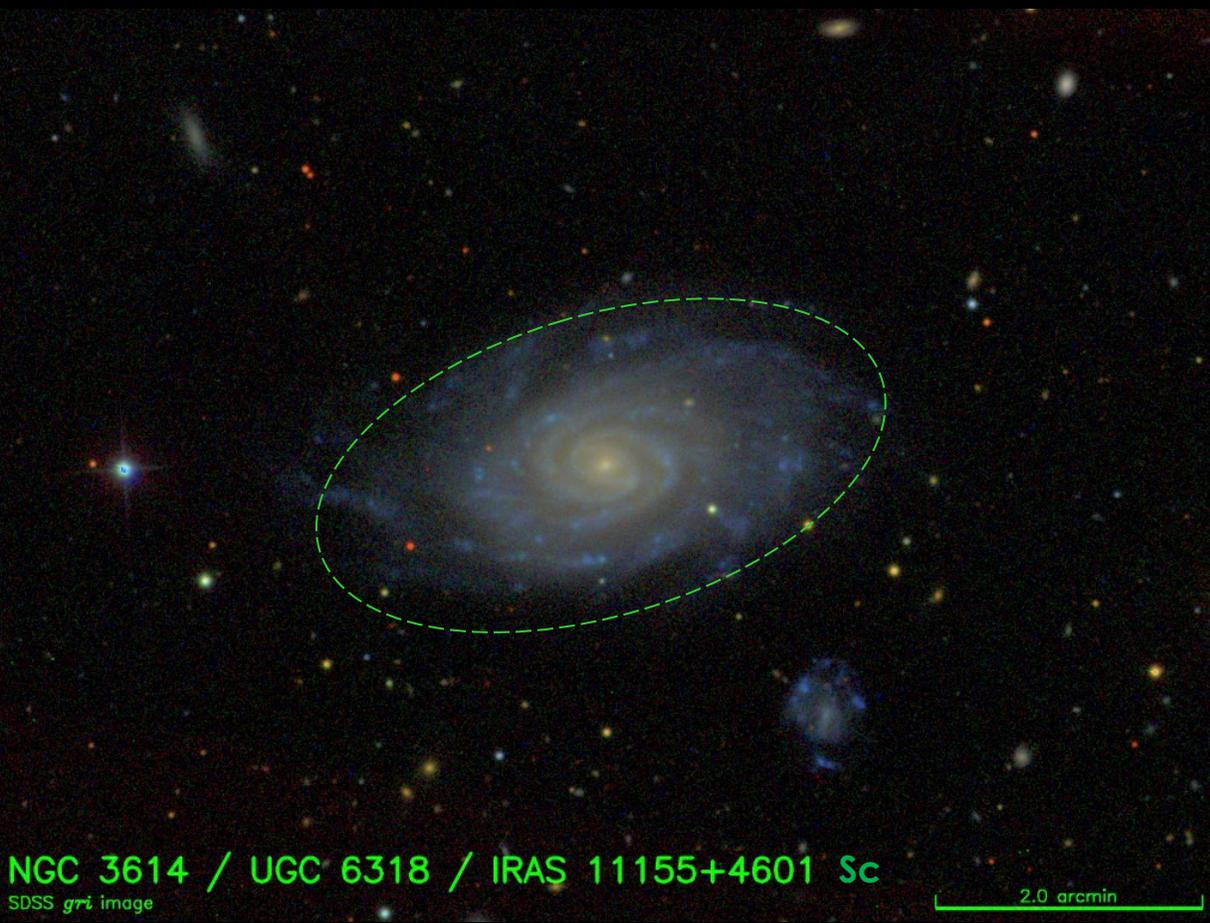
Galáxias Espirais





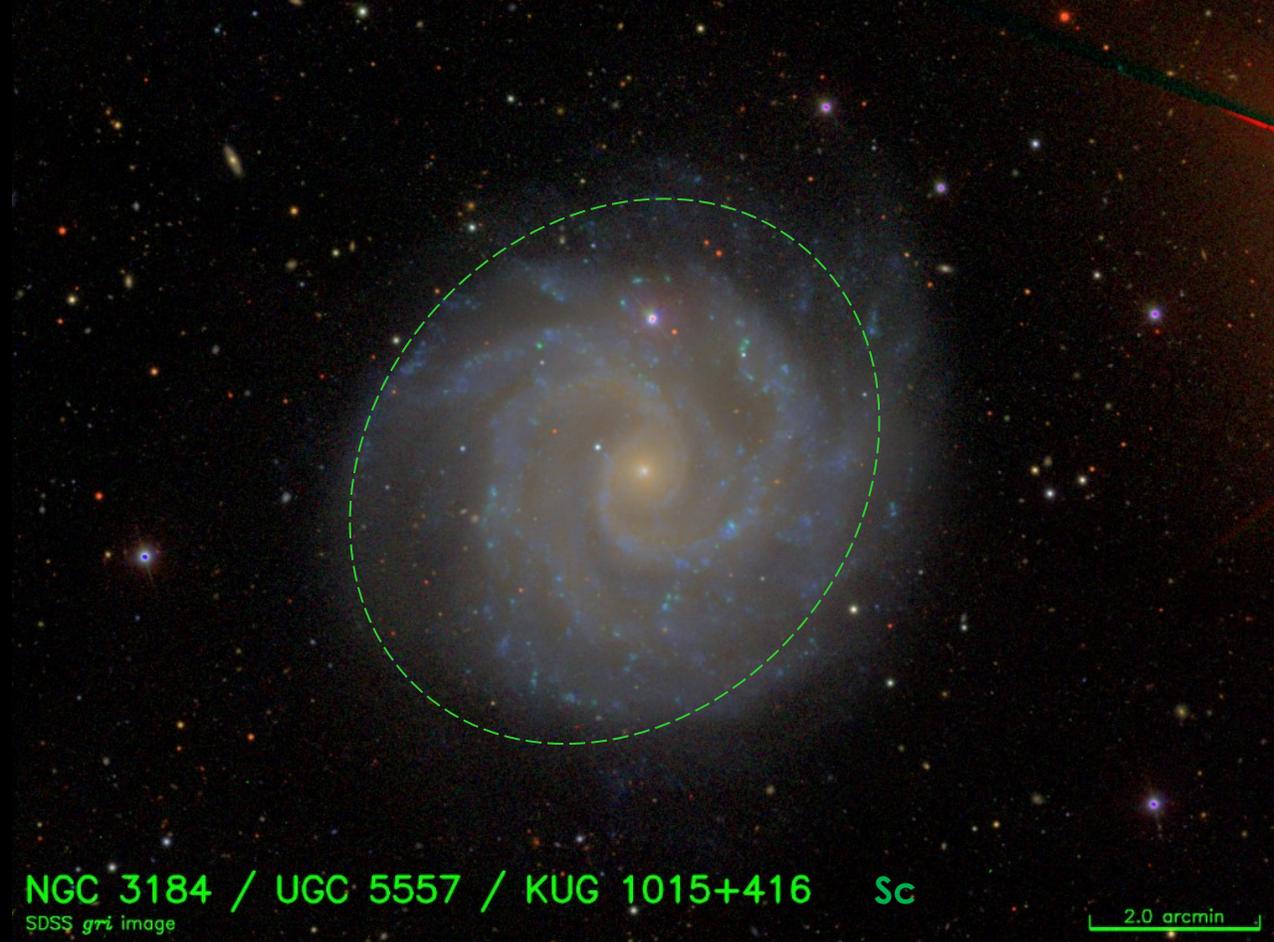






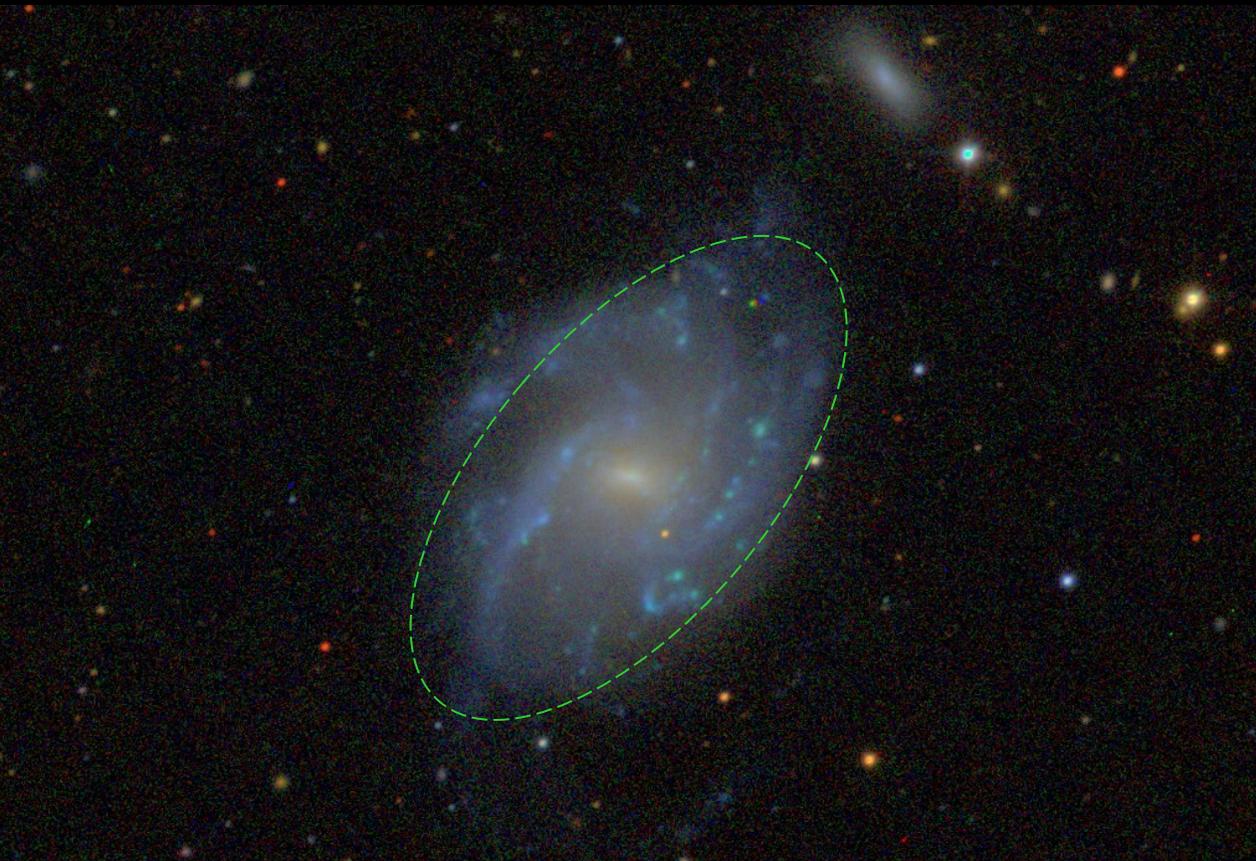
NGC 3614 / UGC 6318 / IRAS 11155+4601 Sc
SDSS *gri* image

2.0 arcmin



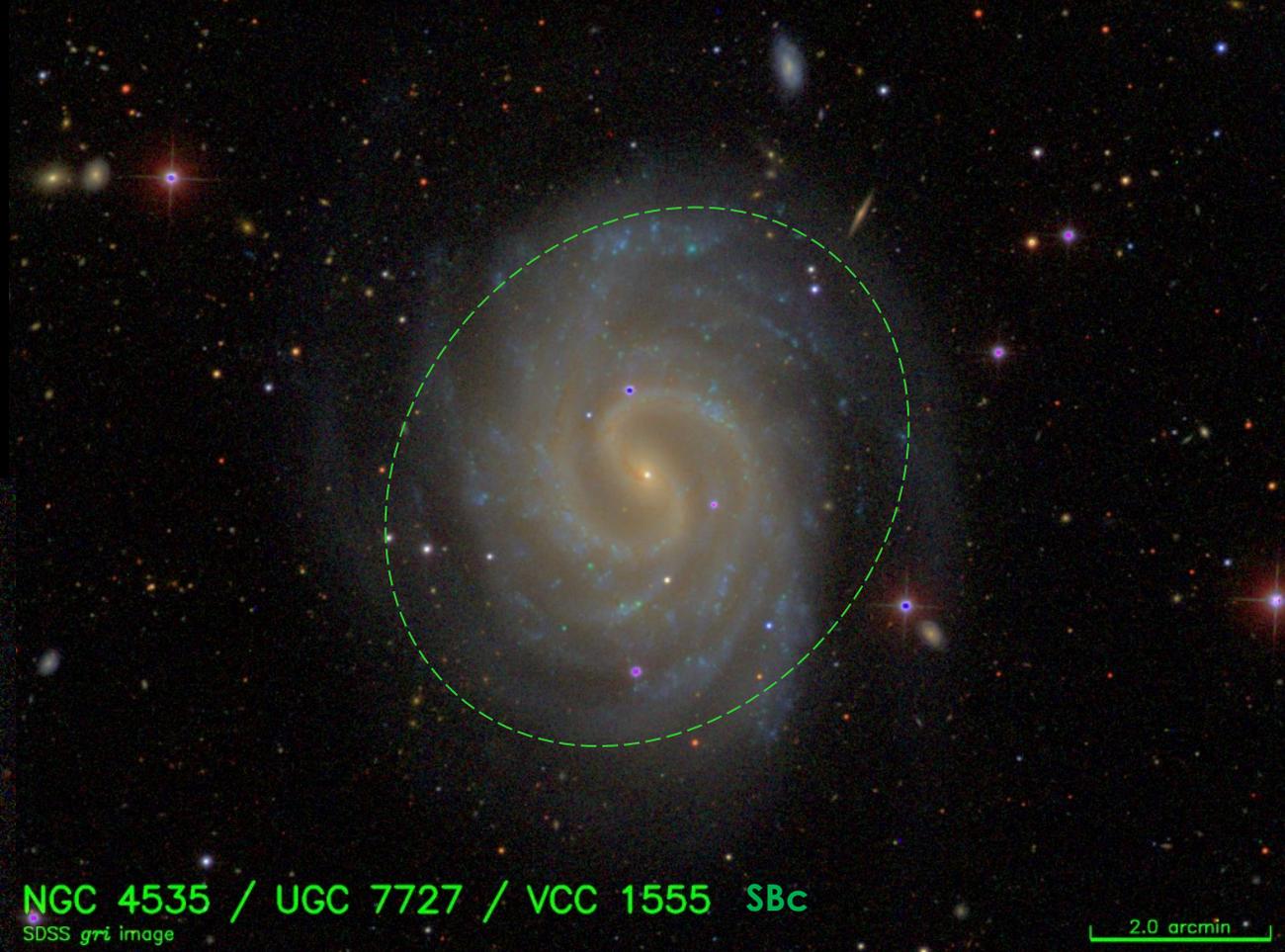
NGC 3184 / UGC 5557 / KUG 1015+416 Sc
SDSS *gri* image

2.0 arcmin



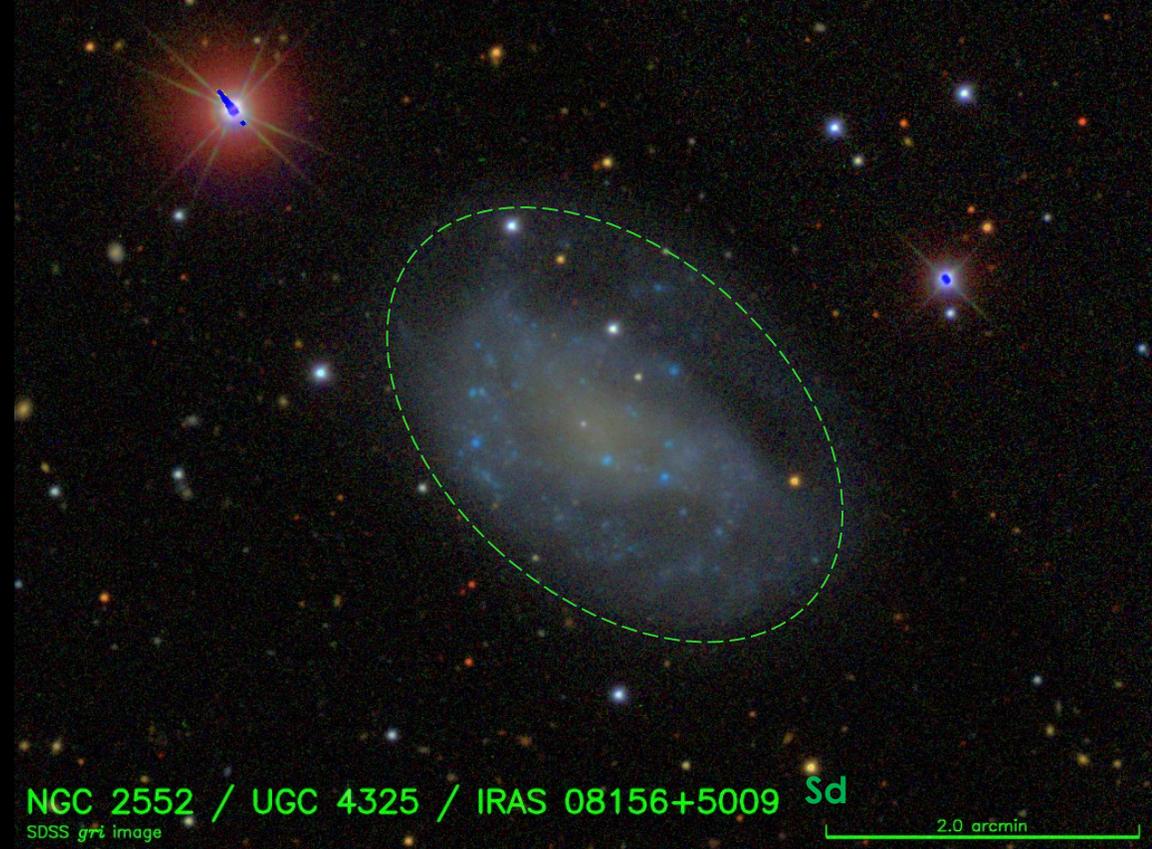
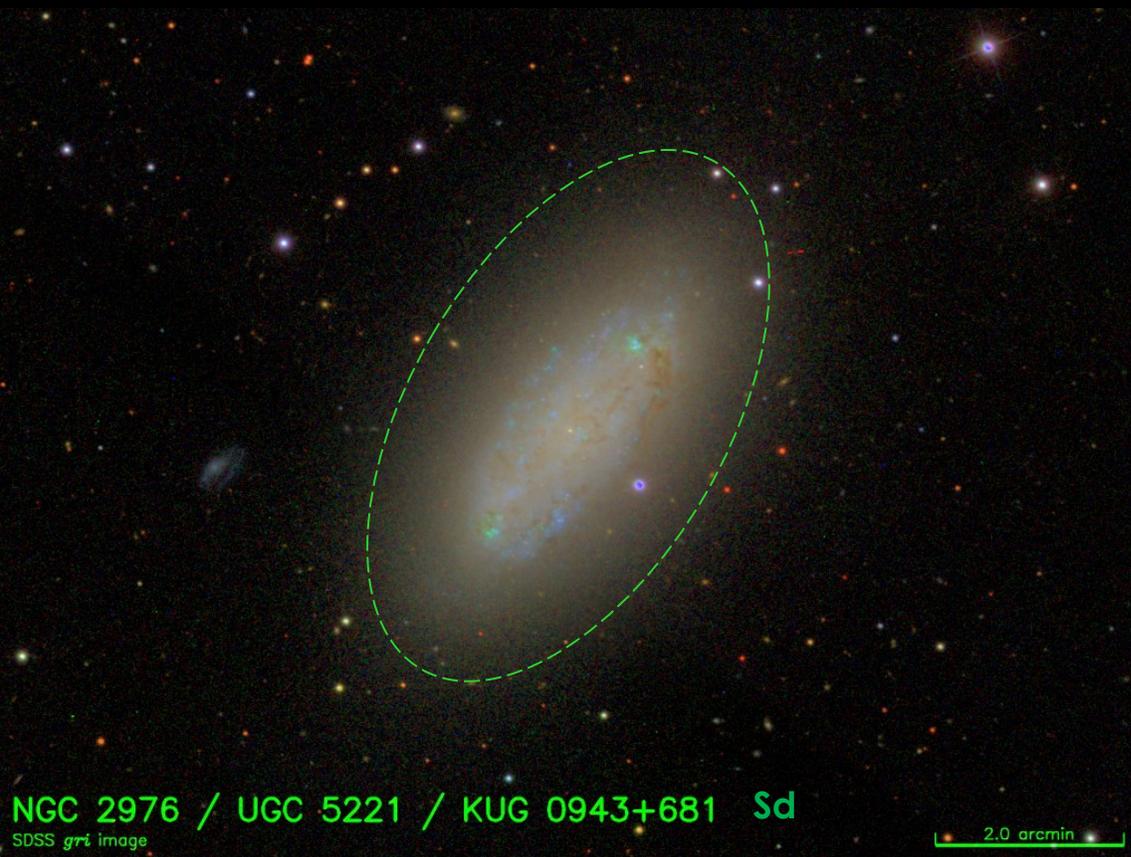
NGC 4519 / UGC 7709 / VCC 1508 SBc
SDSS *gri* image

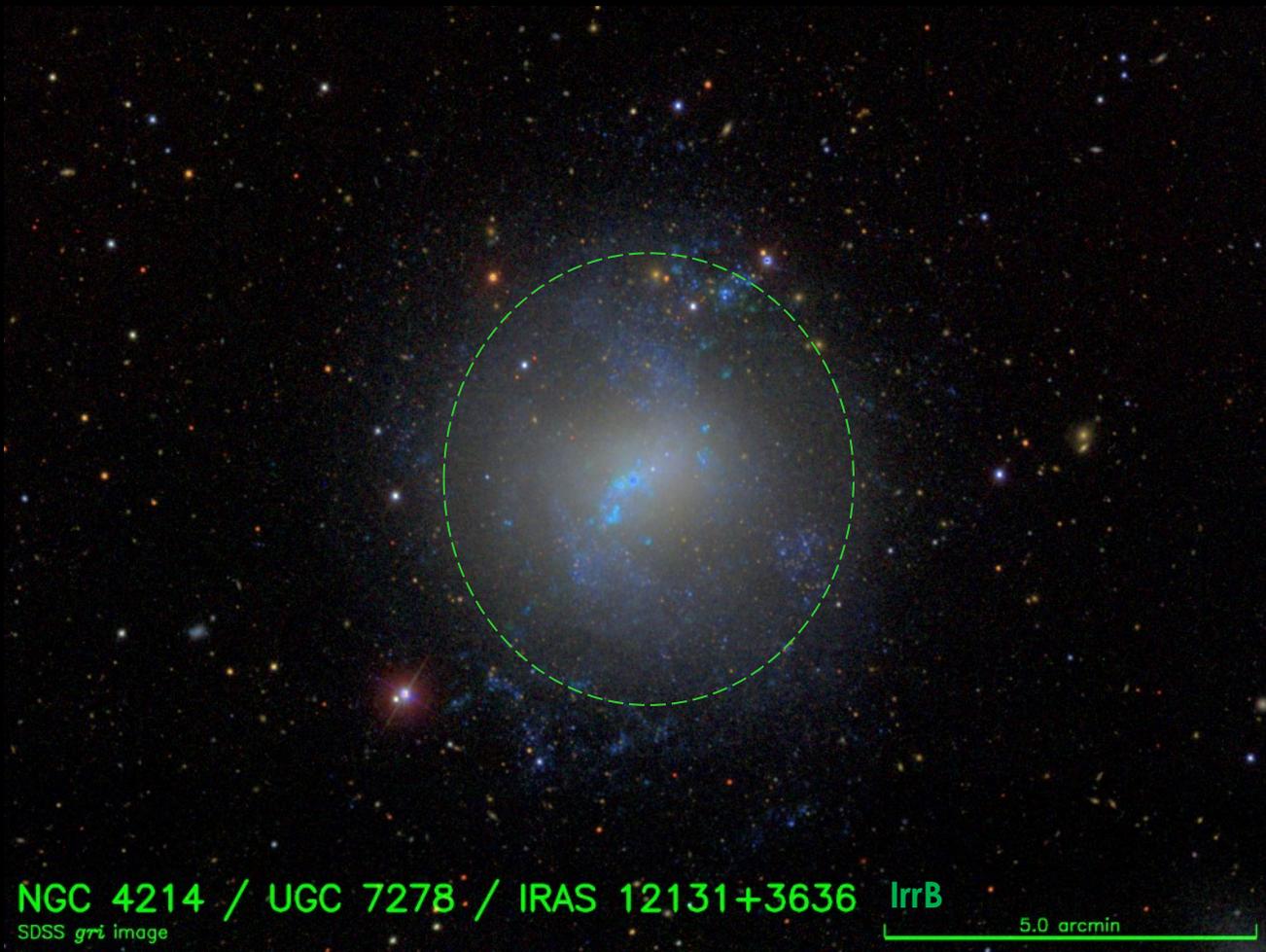
1.0 arcmin



NGC 4535 / UGC 7727 / VCC 1555 SBc
SDSS *gri* image

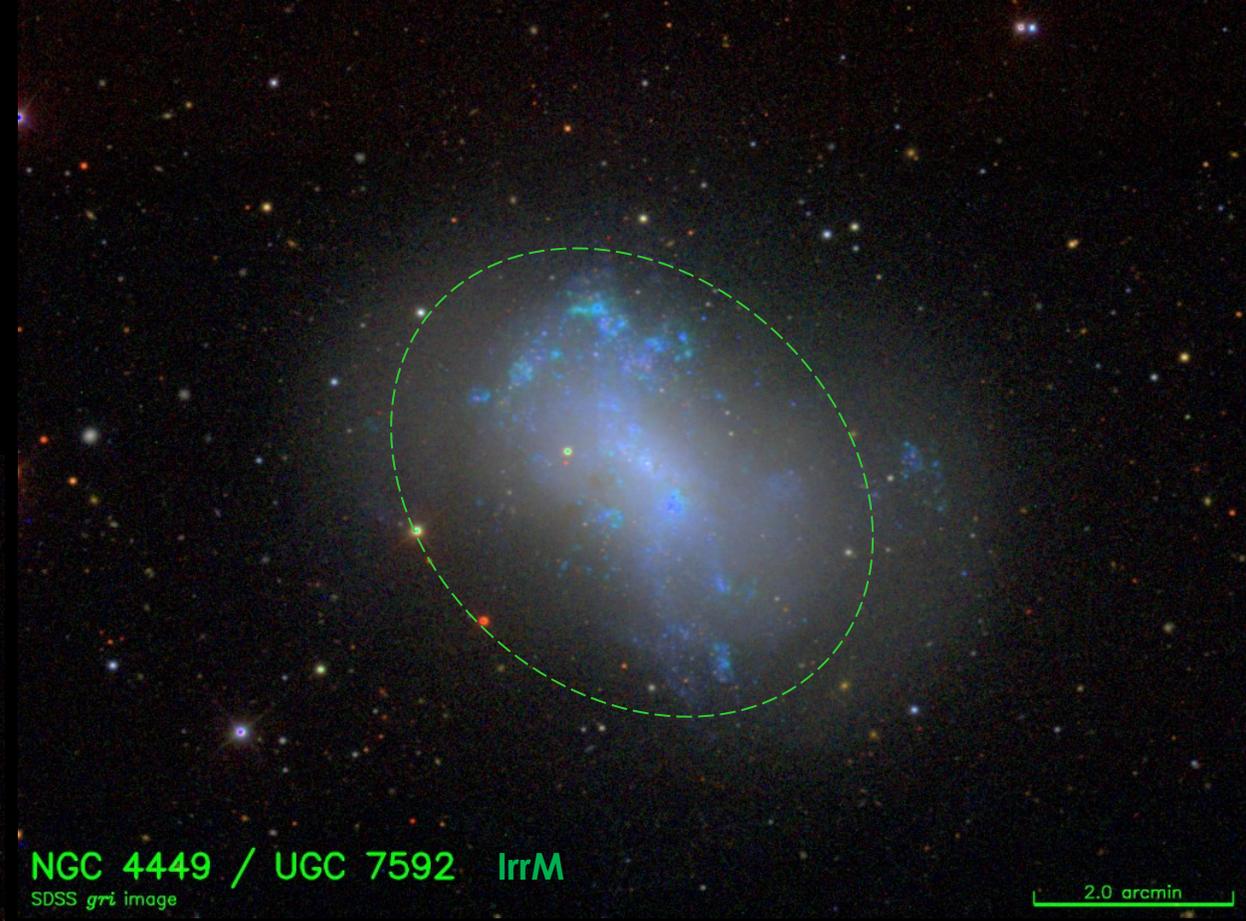
2.0 arcmin





NGC 4214 / UGC 7278 / IRAS 12131+3636 IrrB

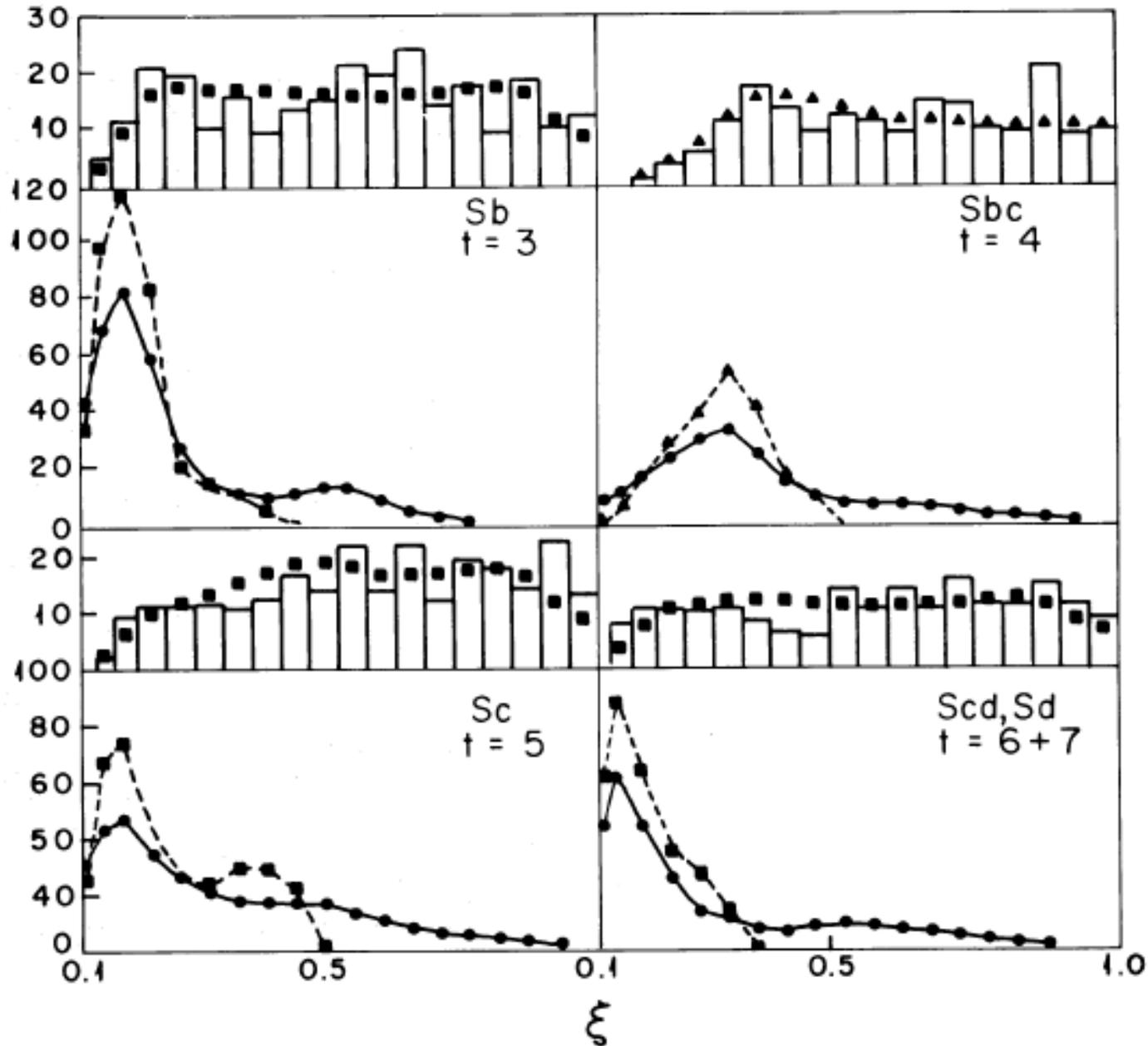
5.0 arcmin



NGC 4449 / UGC 7592 IrrM

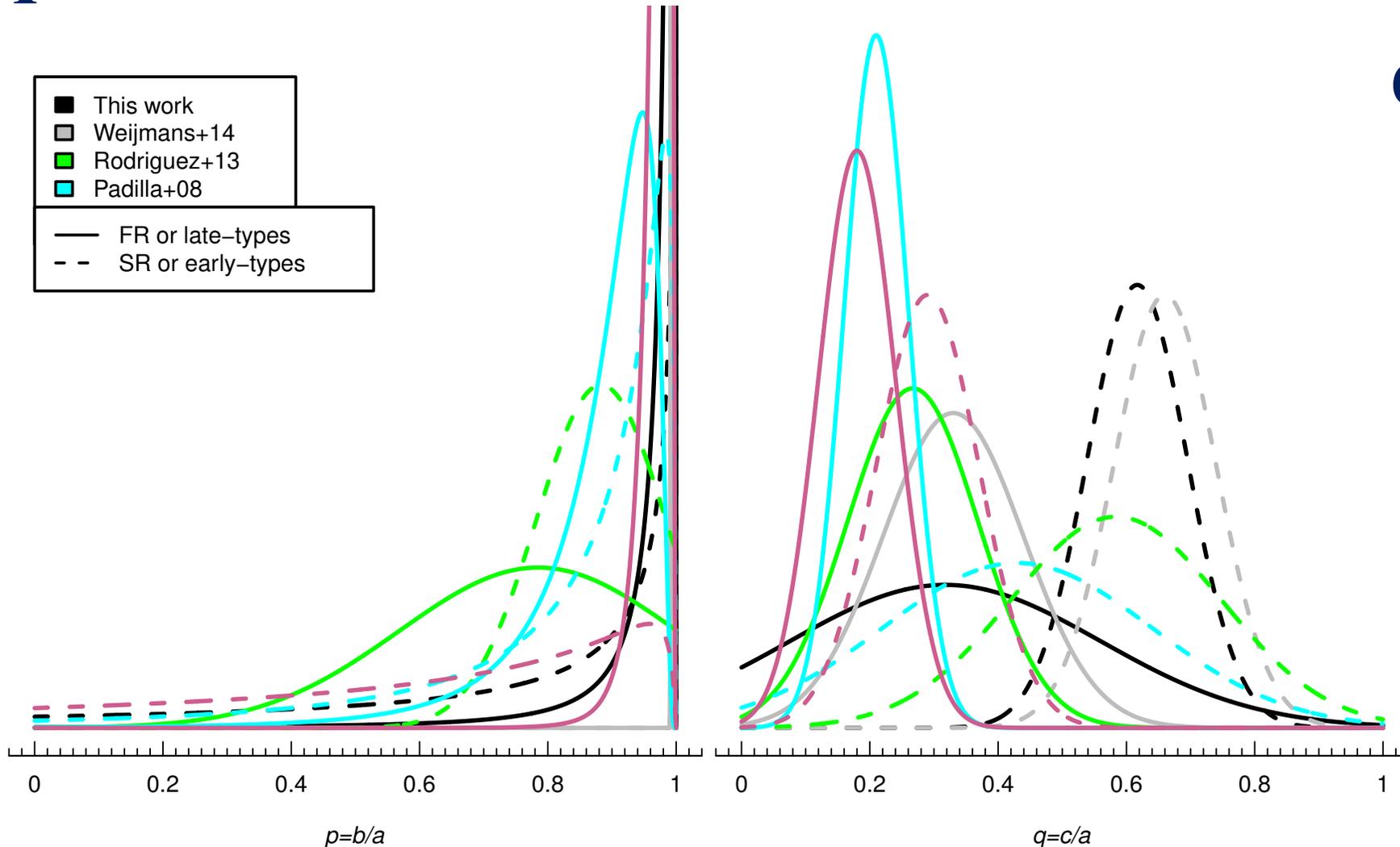
SDSS *gri* image

2.0 arcmin

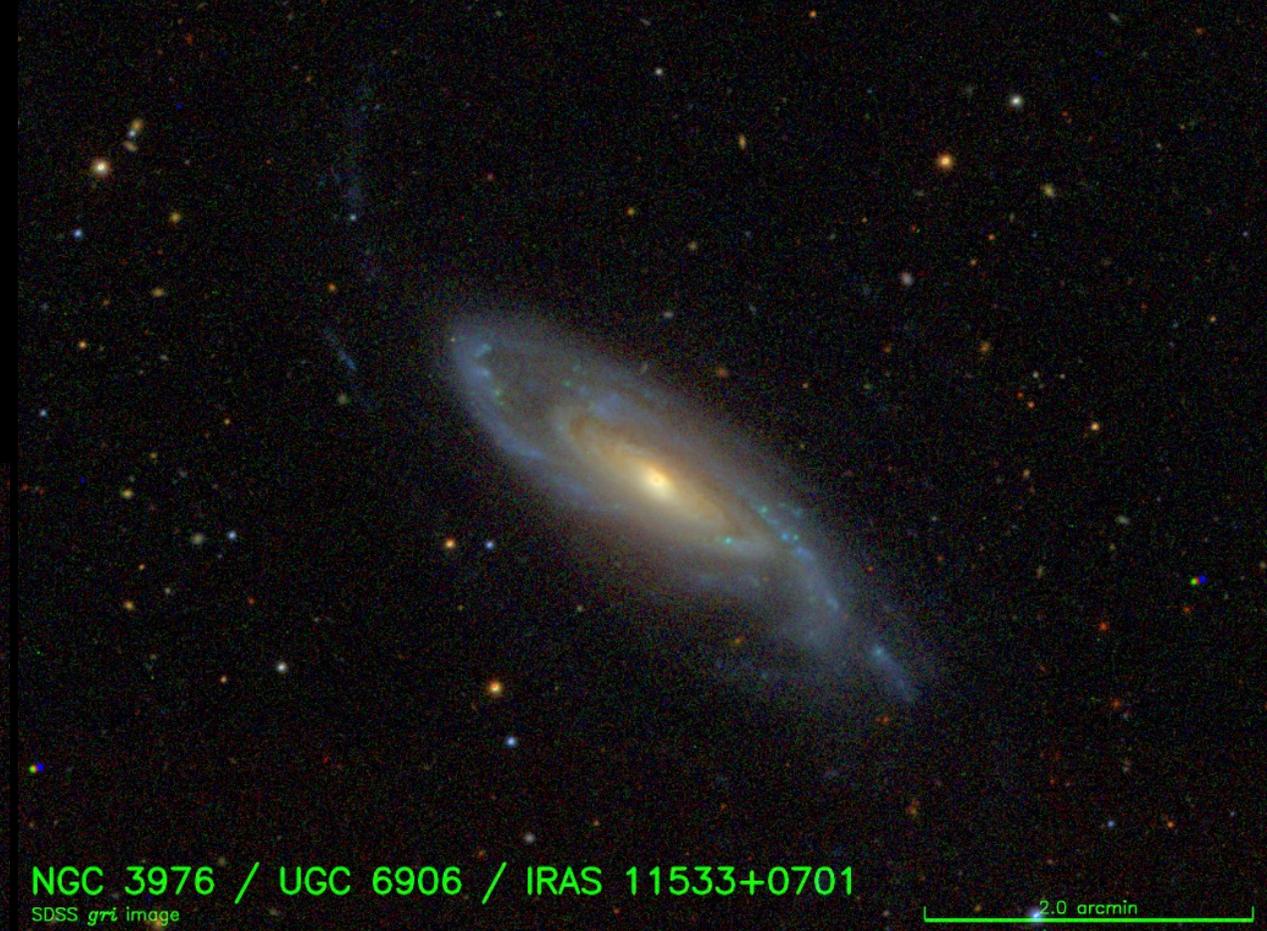
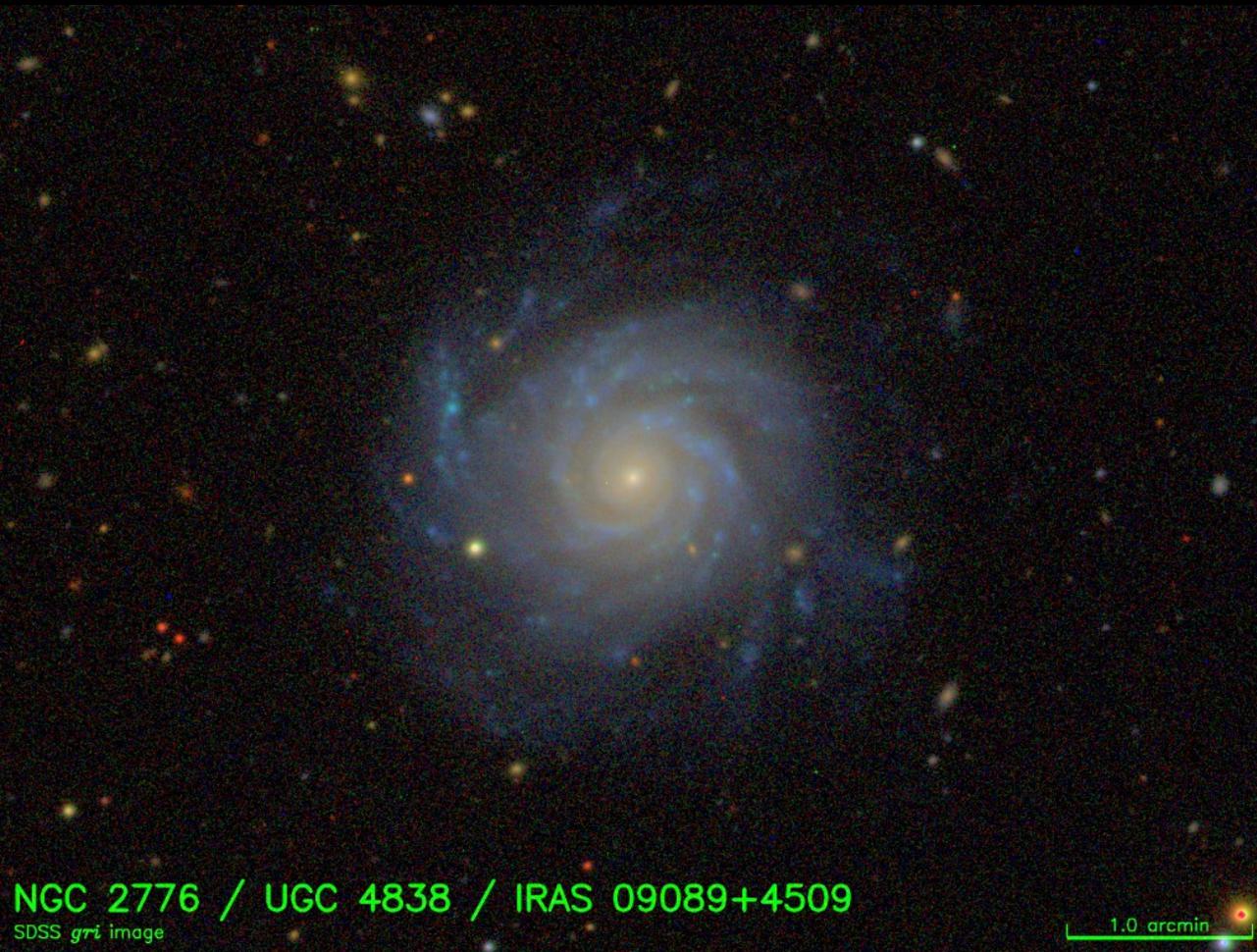


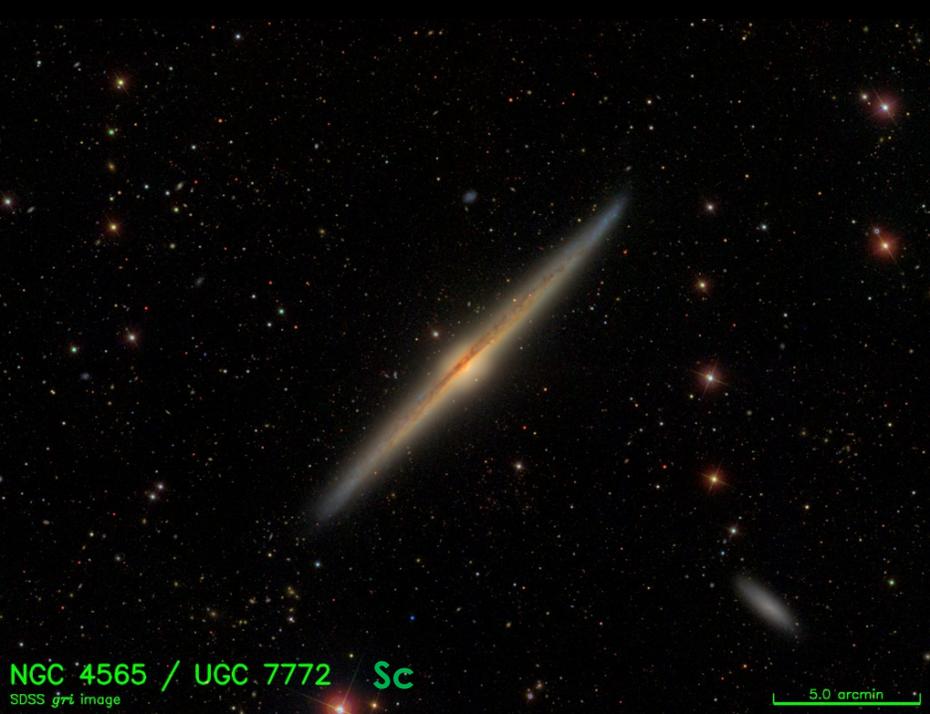
A análise de Binney & de Vaucouleurs mostrou que as galáxias espirais apresentam um achatamento intrínseco reduzido, $\xi \cong 0,15-0,20$, e portanto próximo da hipótese de disco fino.

Foster et al (2017) mostraram que as galáxias espirais, rotatores rápidos, apresentam $\xi \cong 0,15-0,30$, enquanto que nos rotatores lentos a razão axial é mais próxima de $\xi \cong 0,60-0,70$.



Qual seria a classificação destas galáxias?

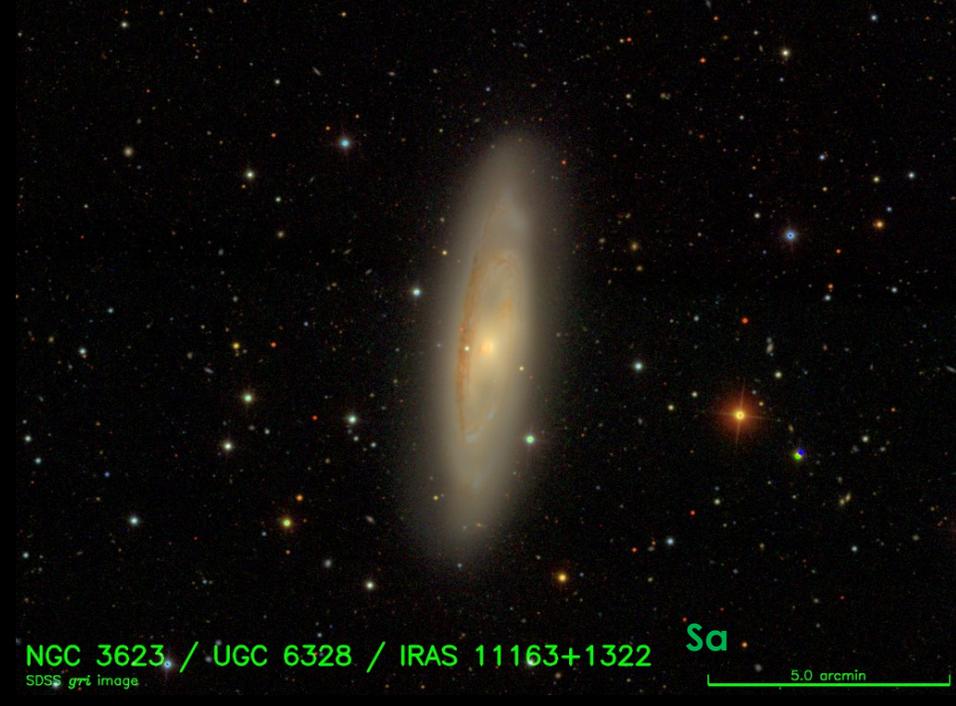




NGC 4565 / UGC 7772 / Sc

SDSS *gri* image

5.0 arcmin

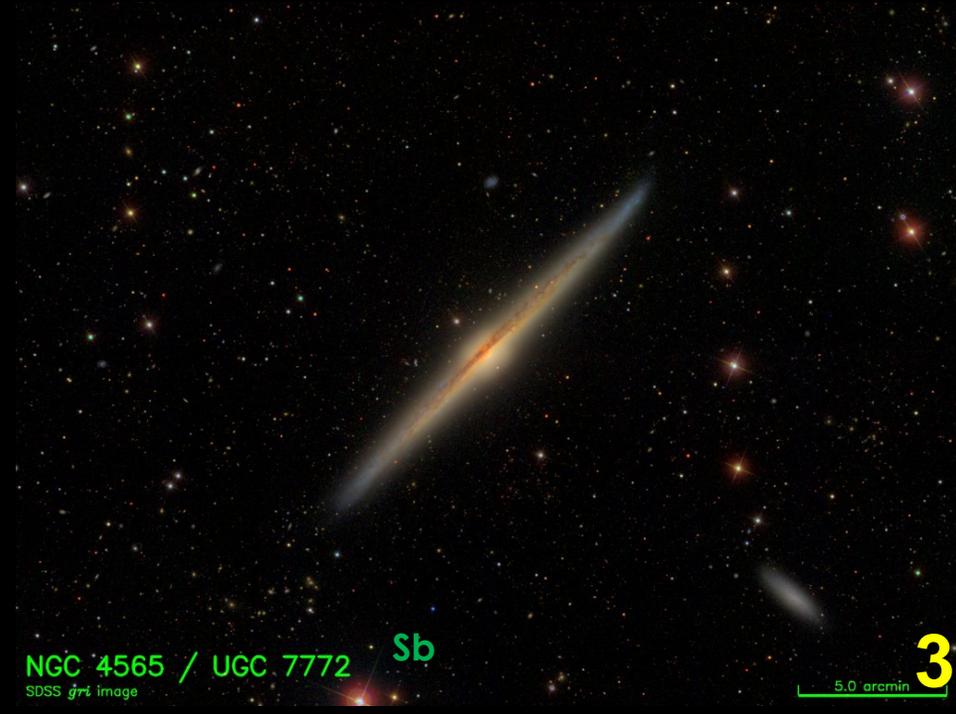


NGC 3623 / UGC 6328 / IRAS 11163+1322

SDSS *gri* image

Sa

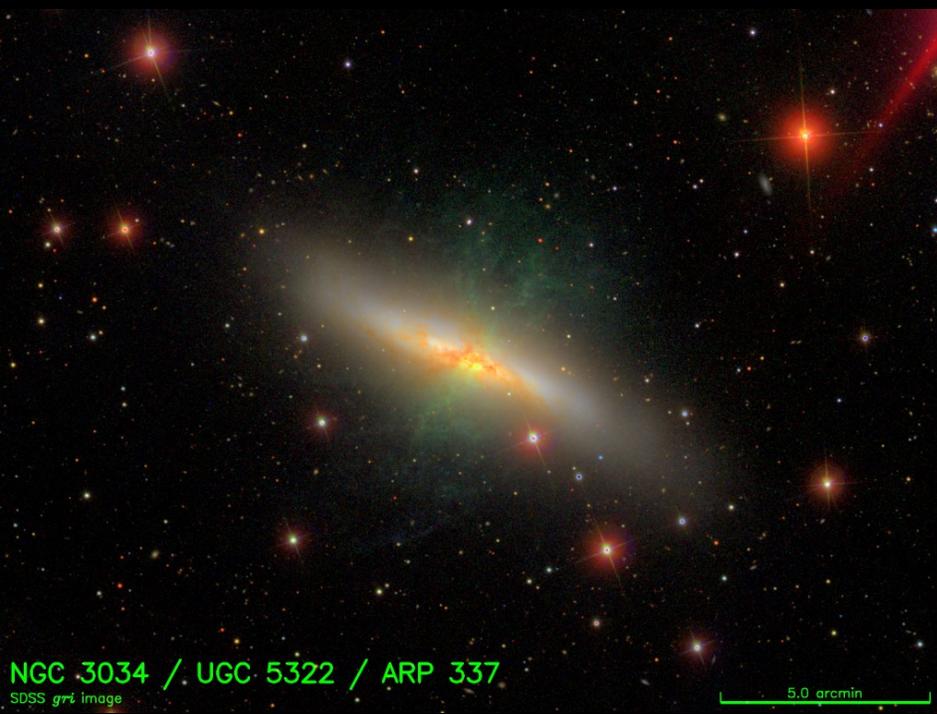
5.0 arcmin



NGC 4565 / UGC 7772 / Sb

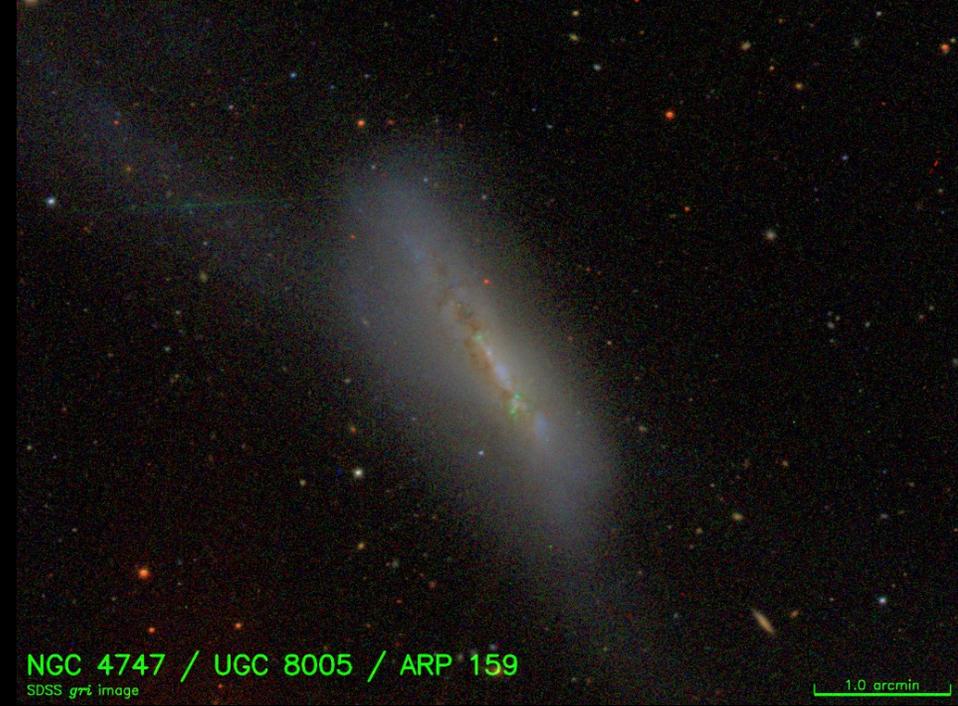
SDSS *gri* image

5.0 arcmin



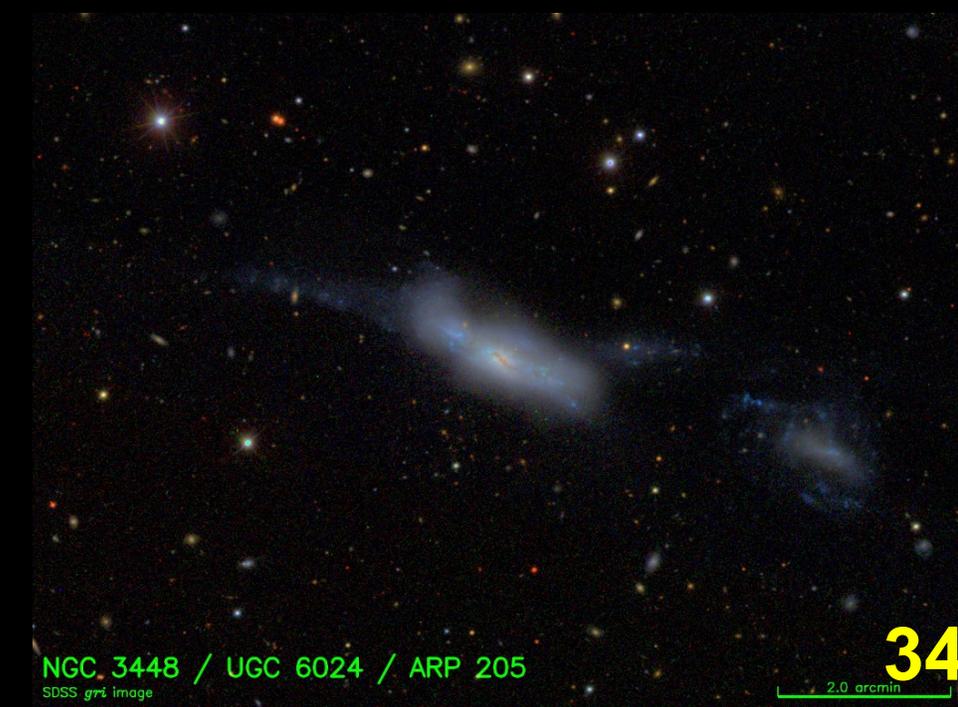
NGC 3034 / UGC 5322 / ARP 337
SDSS *gri* image

5.0 arcmin



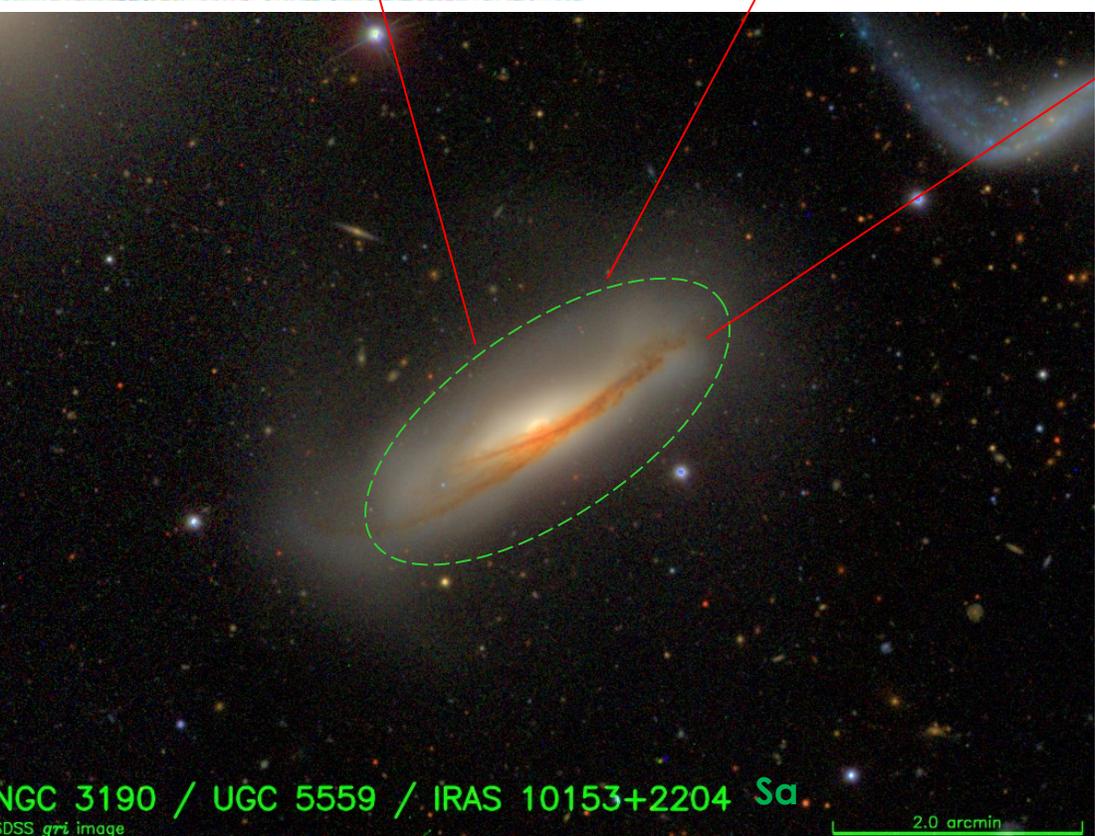
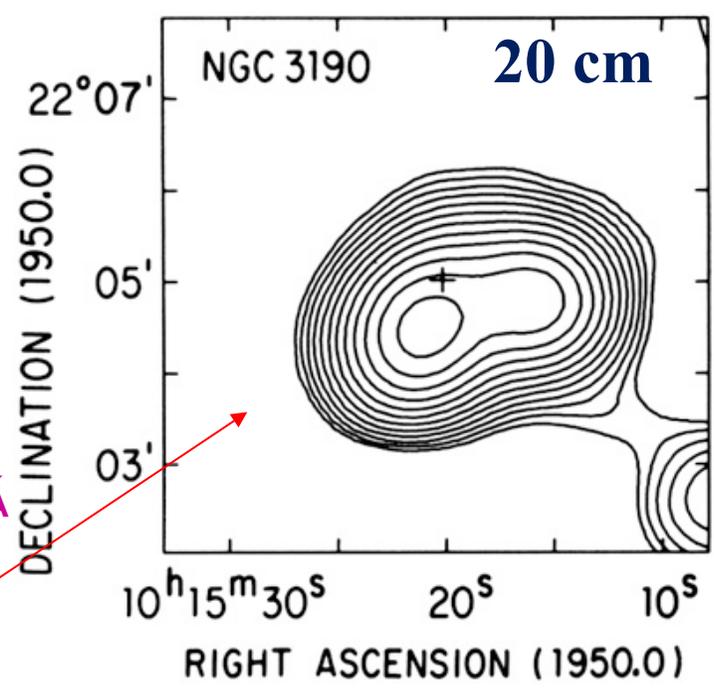
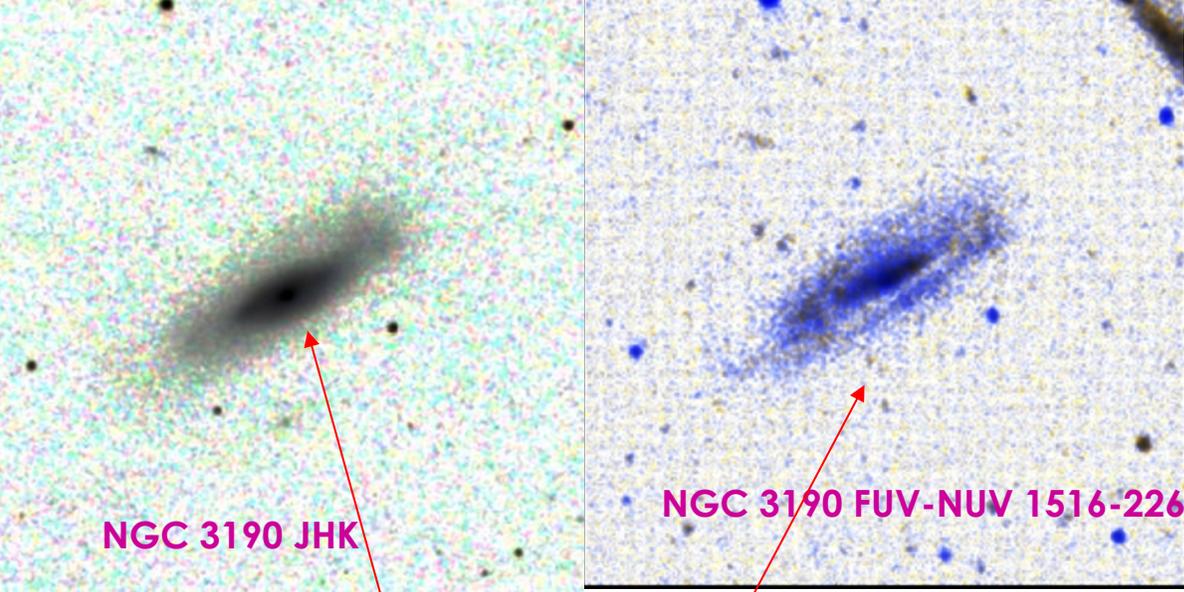
NGC 4747 / UGC 8005 / ARP 159
SDSS *gri* image

1.0 arcmin



NGC 3448 / UGC 6024 / ARP 205
SDSS *gri* image

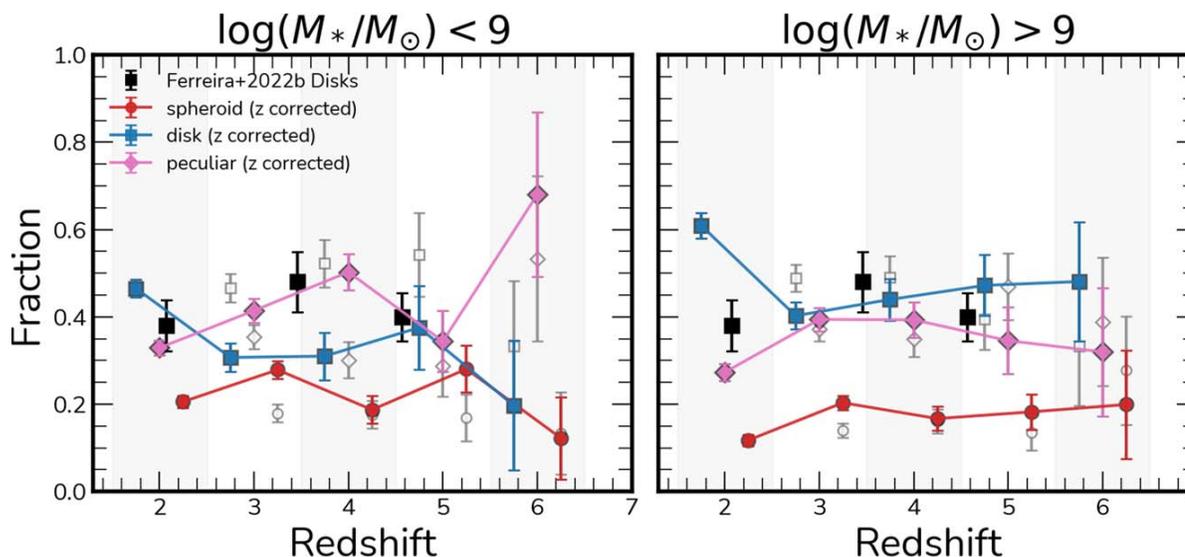
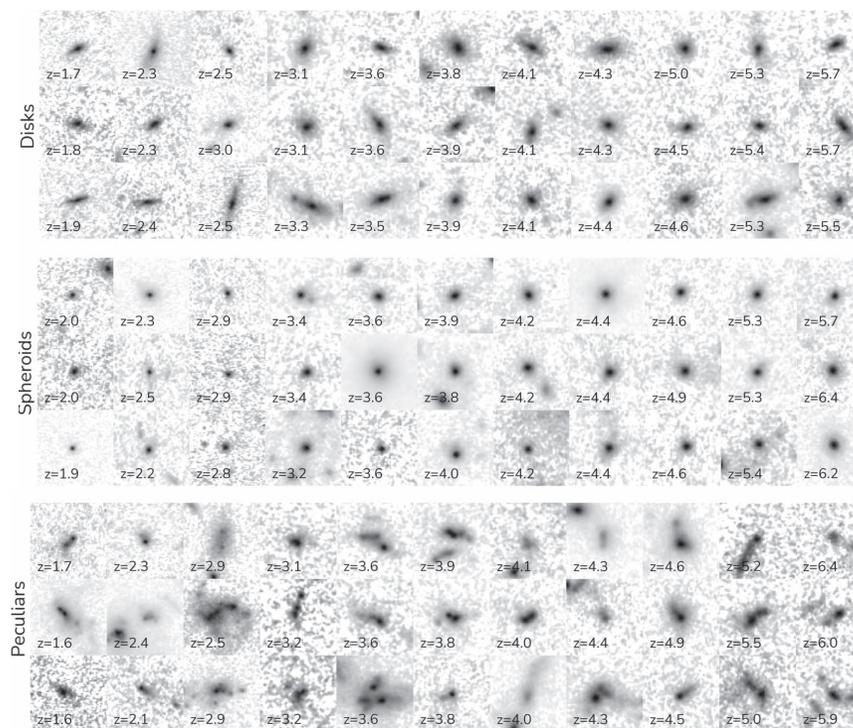
2.0 arcmin



Observe que a imagem que temos de uma galáxia depende do comprimento de onda da observação!

Os dados morfológicos de 3 956 objetos, com $1,5 < z < 6,5$, observados pelo JWST (Ferreira, L. et al, 2023, ApJ, 955, 94) sugerem como ocorreu a evolução recente do Universo dos objetos com $M_* > 10^9 M_\odot$ na classificação de Hubble.

1. As galáxias com disco já estavam presentes desde $z \sim 6$ mas com uma fração de $\sim 30\%$ e só mais recentemente a sua proporção cresceu para cerca de 50% .
2. Os esferoides mantiveram uma proporção relativamente constante de $\sim 20\%$ dos objetos.
3. A proporção de objetos peculiares se manteve constante em 35% no intervalo $z \sim 3-6$ e mais recentemente decresceu para 25% .



$t(z)$ 3,3 1,6 0,9 Ganos
 $t_0 = 13,7$ Ganos Λ CDM

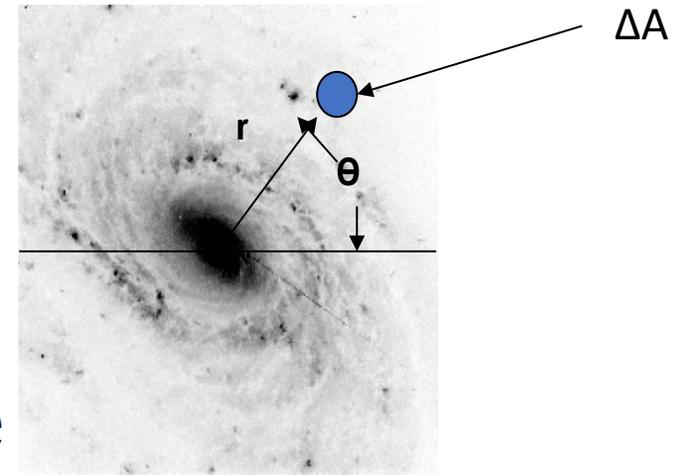
Brilho superficial

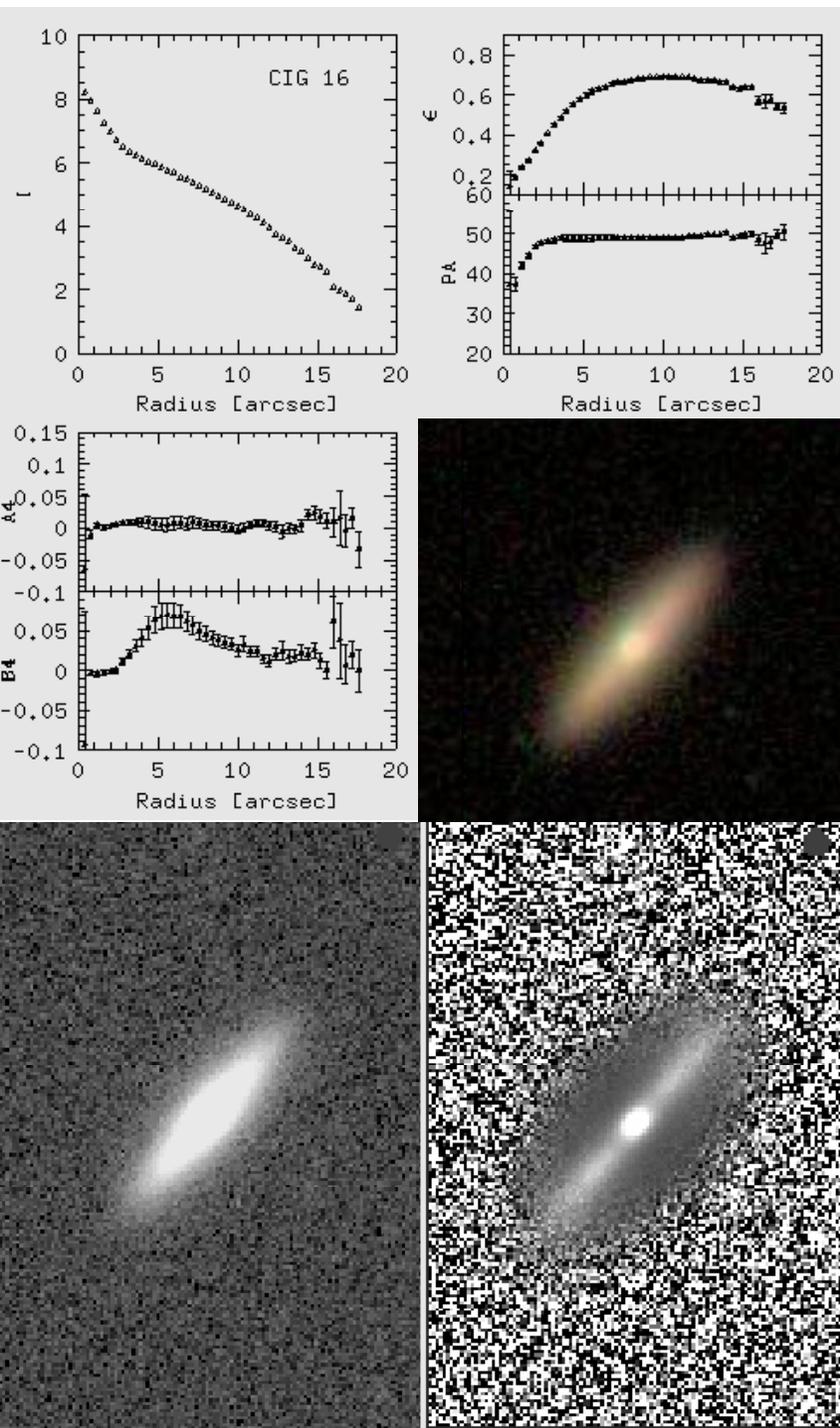
A emissão de uma pequena região da imagem, de área angular ΔA projetada no plano do céu, é indicada por ΔL e o brilho superficial é definido pela razão

$$\text{SBR}(r,\theta) = \Delta L / \Delta A$$

que expressa em unidades de magnitude

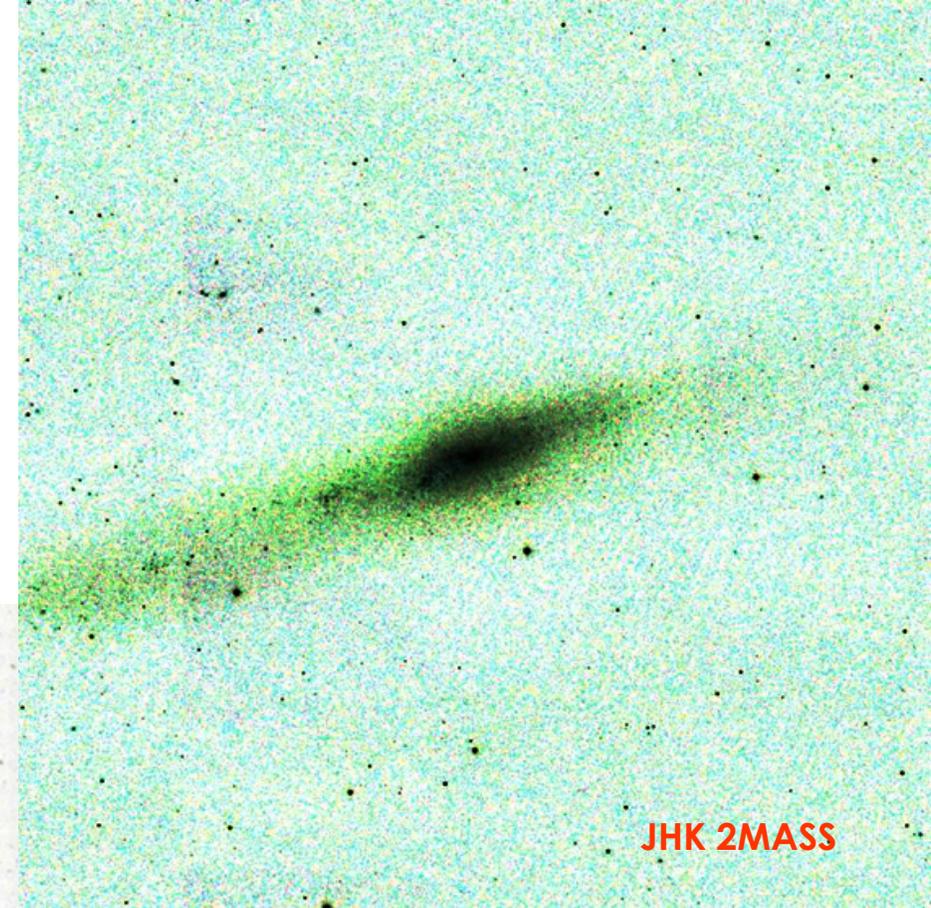
$$I = -2,5 \text{ Log (SBR)}$$



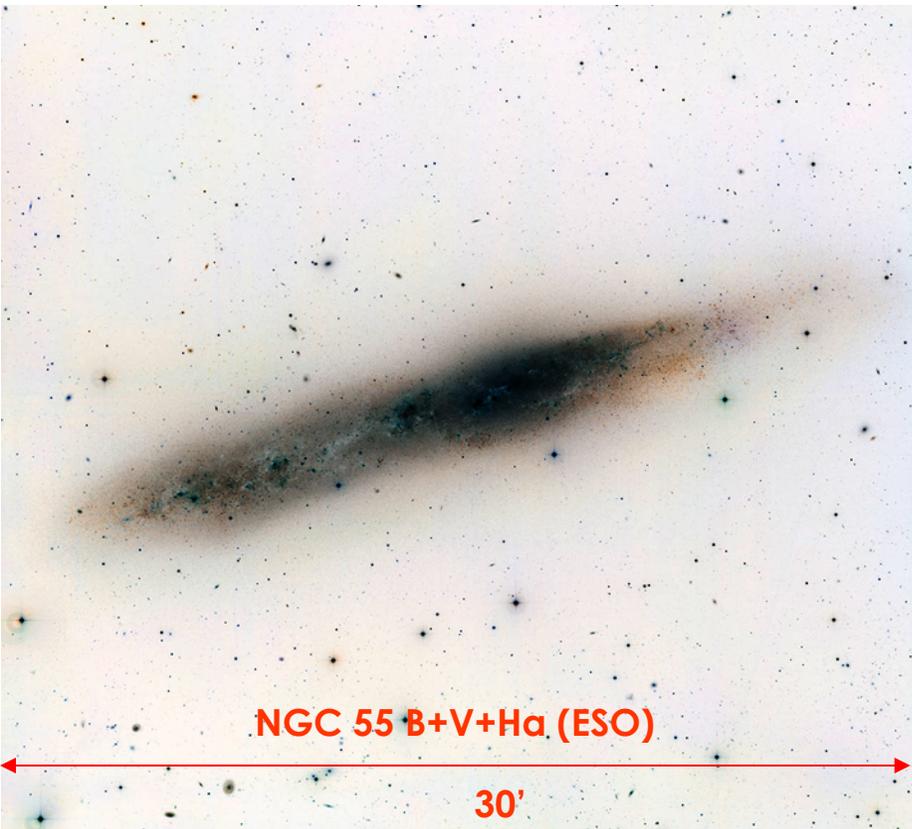


A forma de uma isofota perfeitamente elíptica pode ser descrita em termos de combinações de $\sin 2\theta$ e $\cos 2\theta$. Por outro lado numa elipse distorcida é preciso incluir termos de quarta ordem da análise de Fourier ($A_4 \cos 4\theta + B_4 \sin 4\theta$), ou mesmo de ordens superiores, que se tornam mais importantes.

Será que a imagem observada de uma galáxia pode nos dar pistas da sua forma tridimensional?

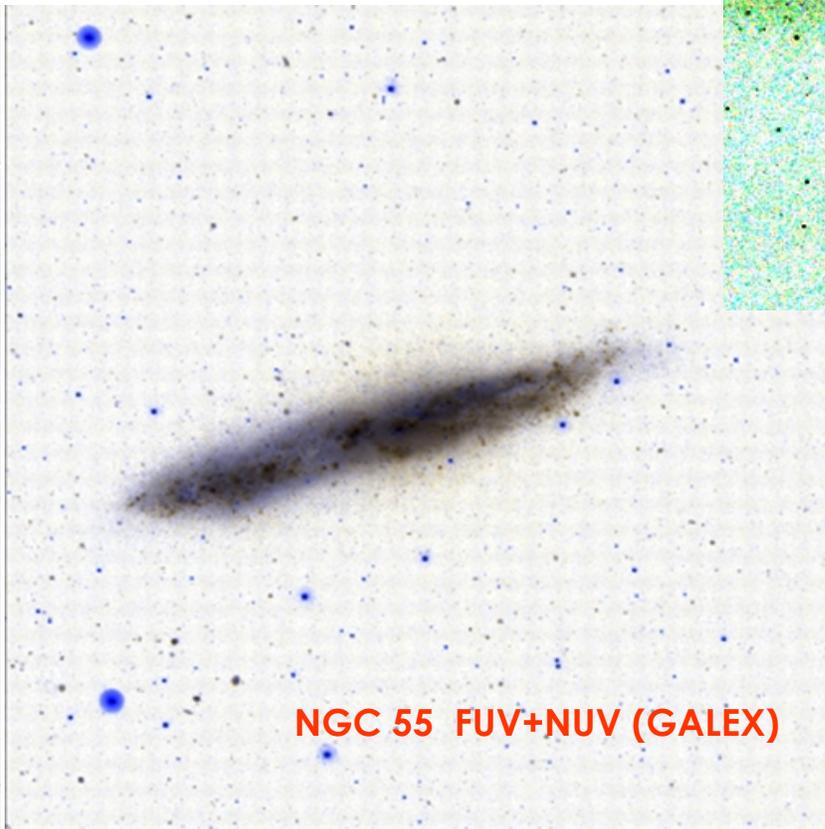


JHK 2MASS



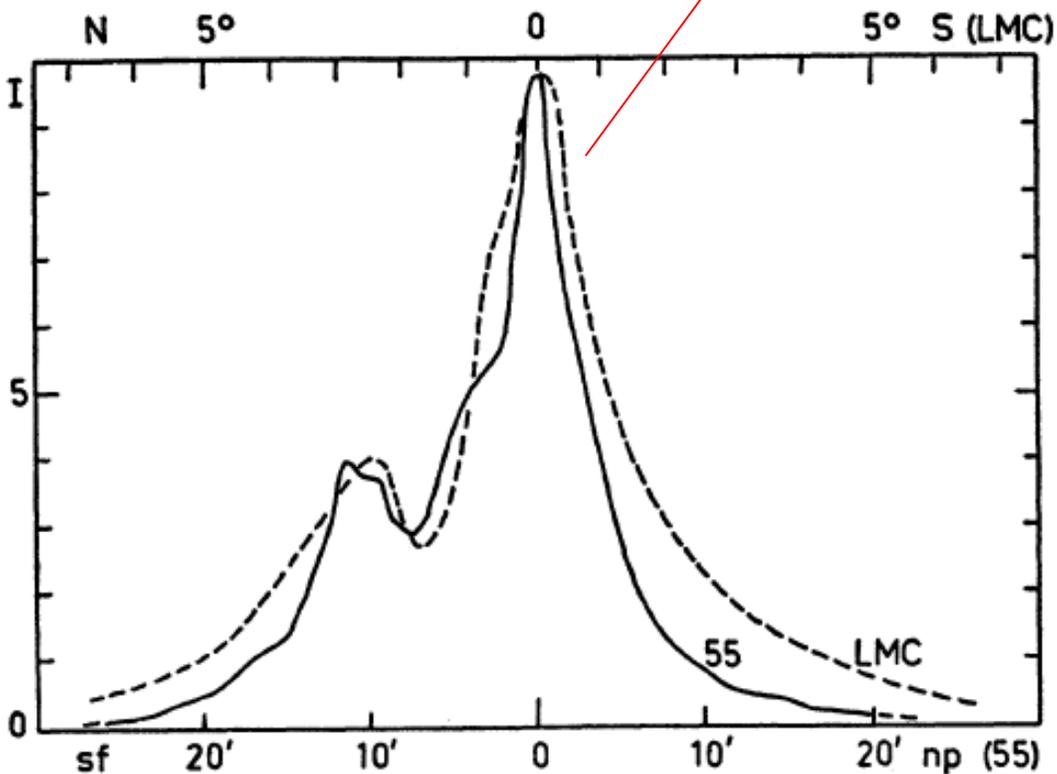
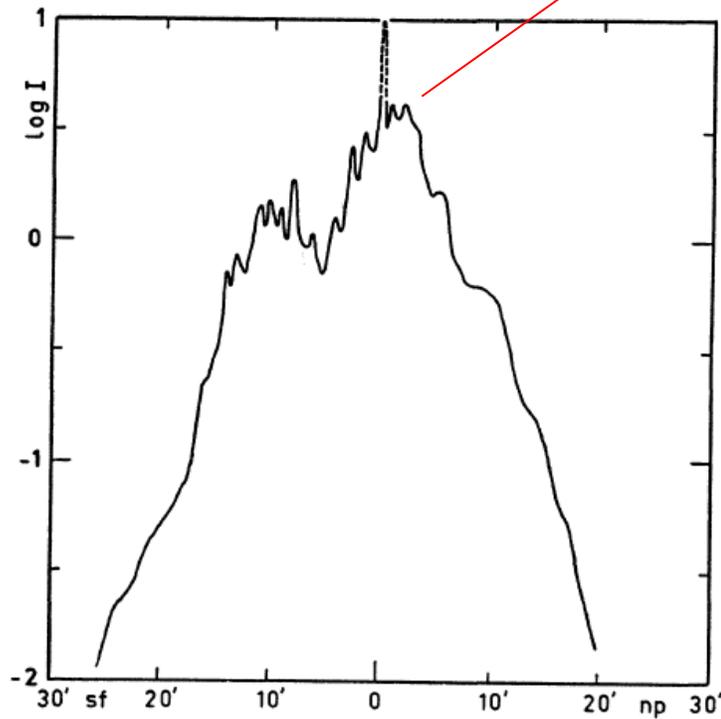
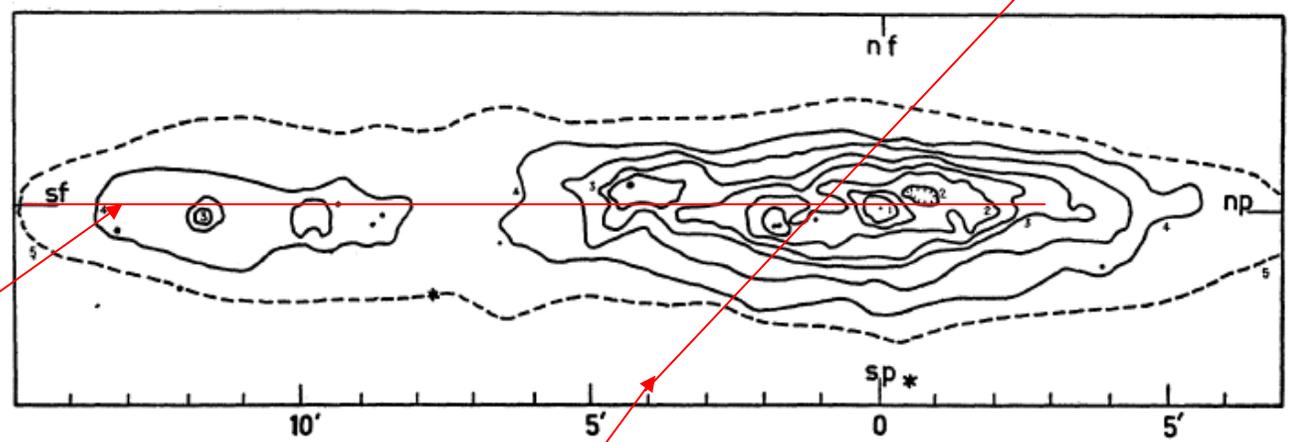
NGC 55 B+V+Ha (ESO)

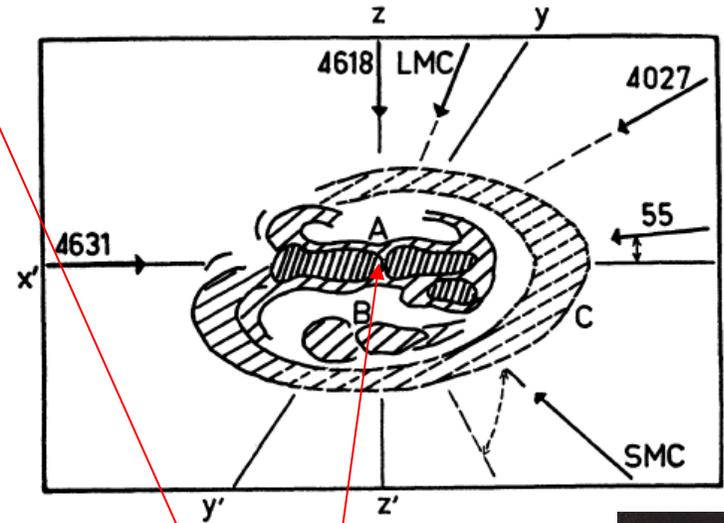
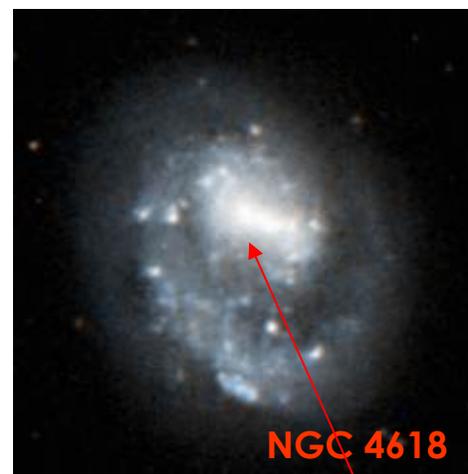
30'



NGC 55 FUV+NUV (GALEX)

de Vaucouleurs (1961) mostrou as semelhanças entre NGC 55 e a Grande Nuvem de Magalhães!

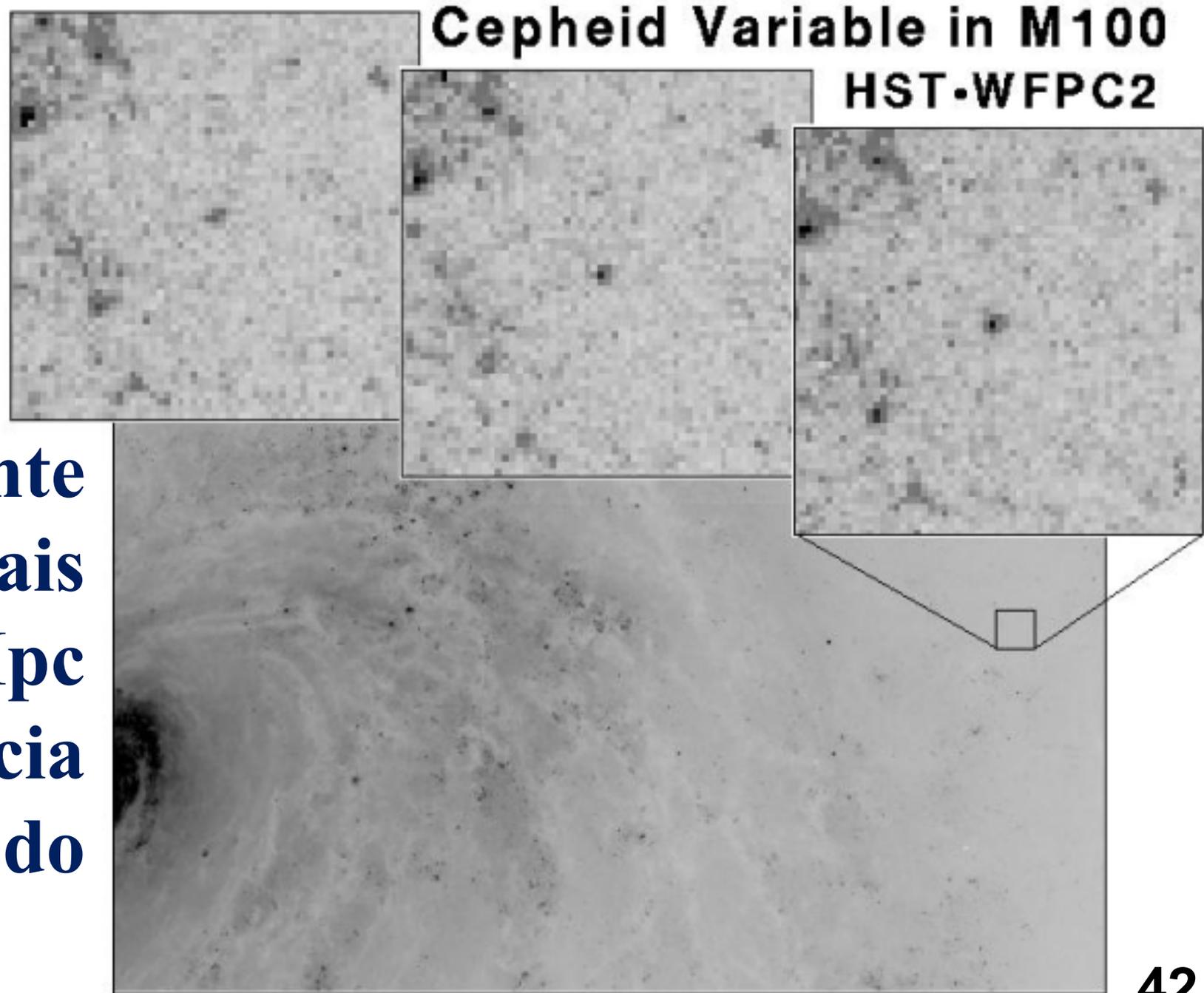




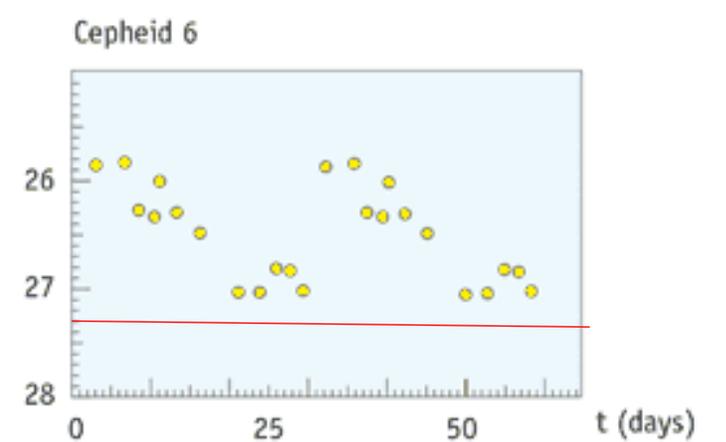
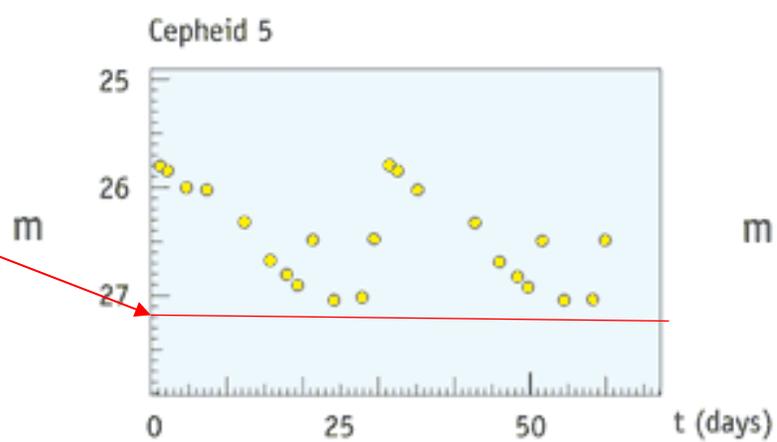
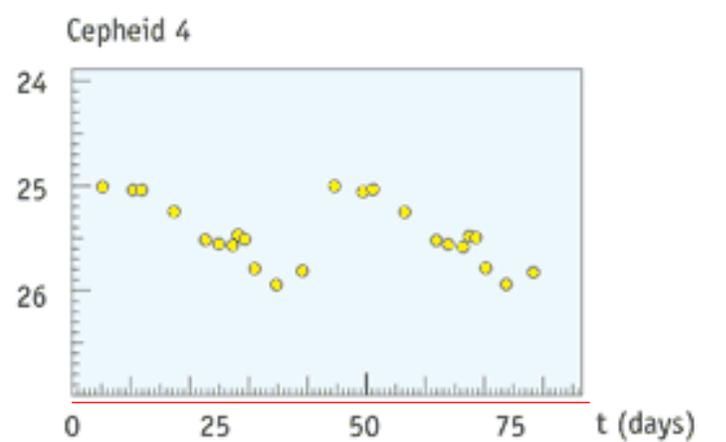
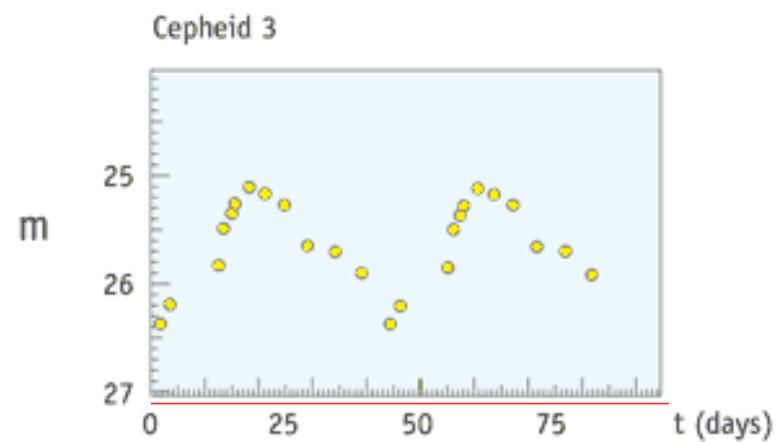
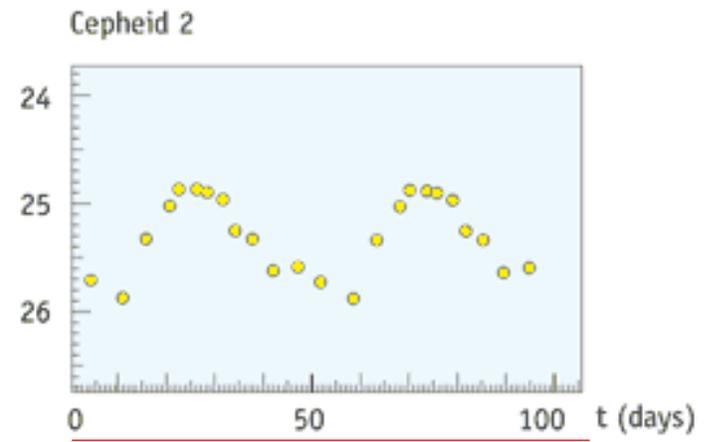
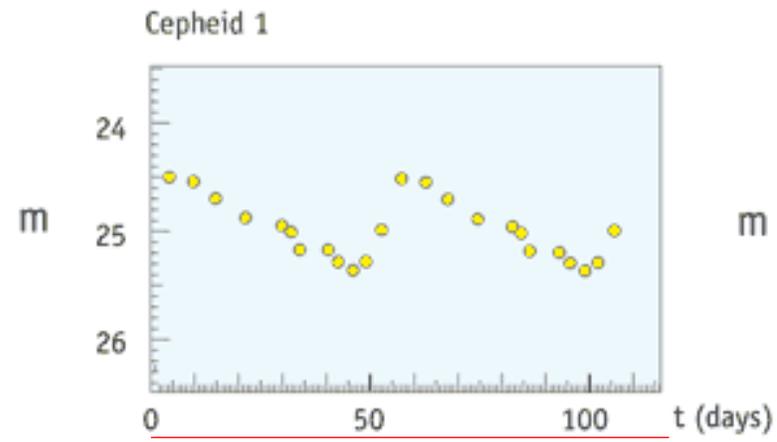
Para de Vaucouleurs várias das galáxias irregulares podem ser membros da classe das LMC (IrrB)!

Distâncias das galáxias

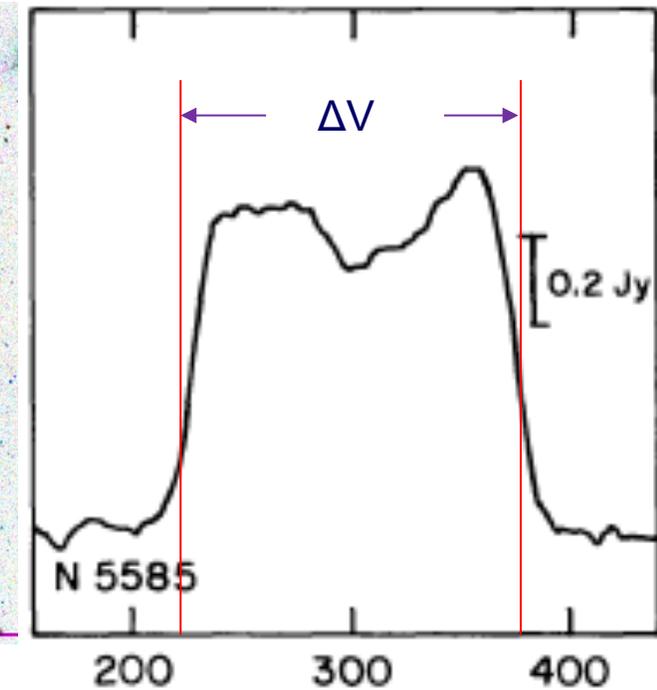
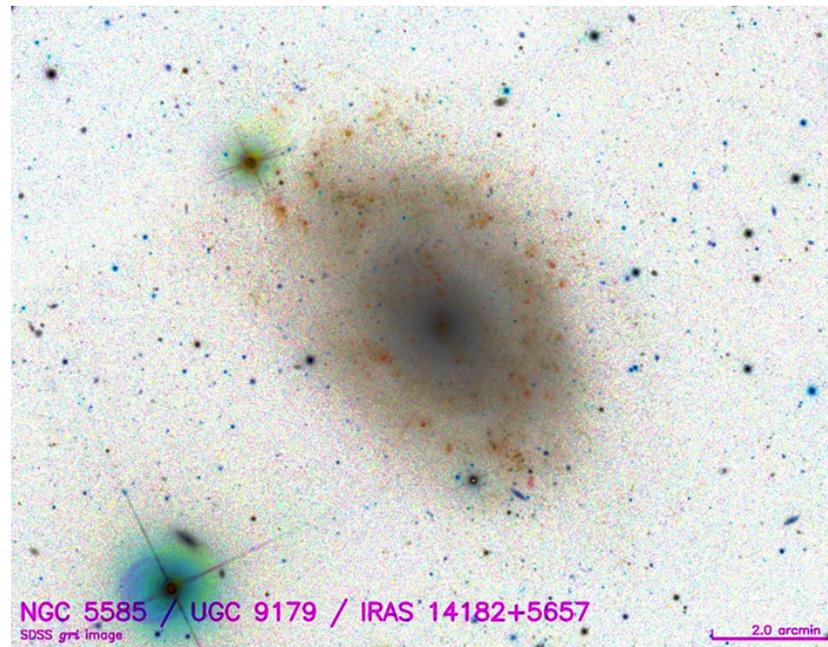
No momento somente as galáxias mais próximas que 10 Mpc podem ter a distância estimada pelo método das Cefeídas!



Como estimar a distância das galáxias mais afastadas que ultrapassam o limite de detecção das cefeidas?



Como alternativa podemos usar a relação Tully-Fisher obtida pela estrutura das galáxias

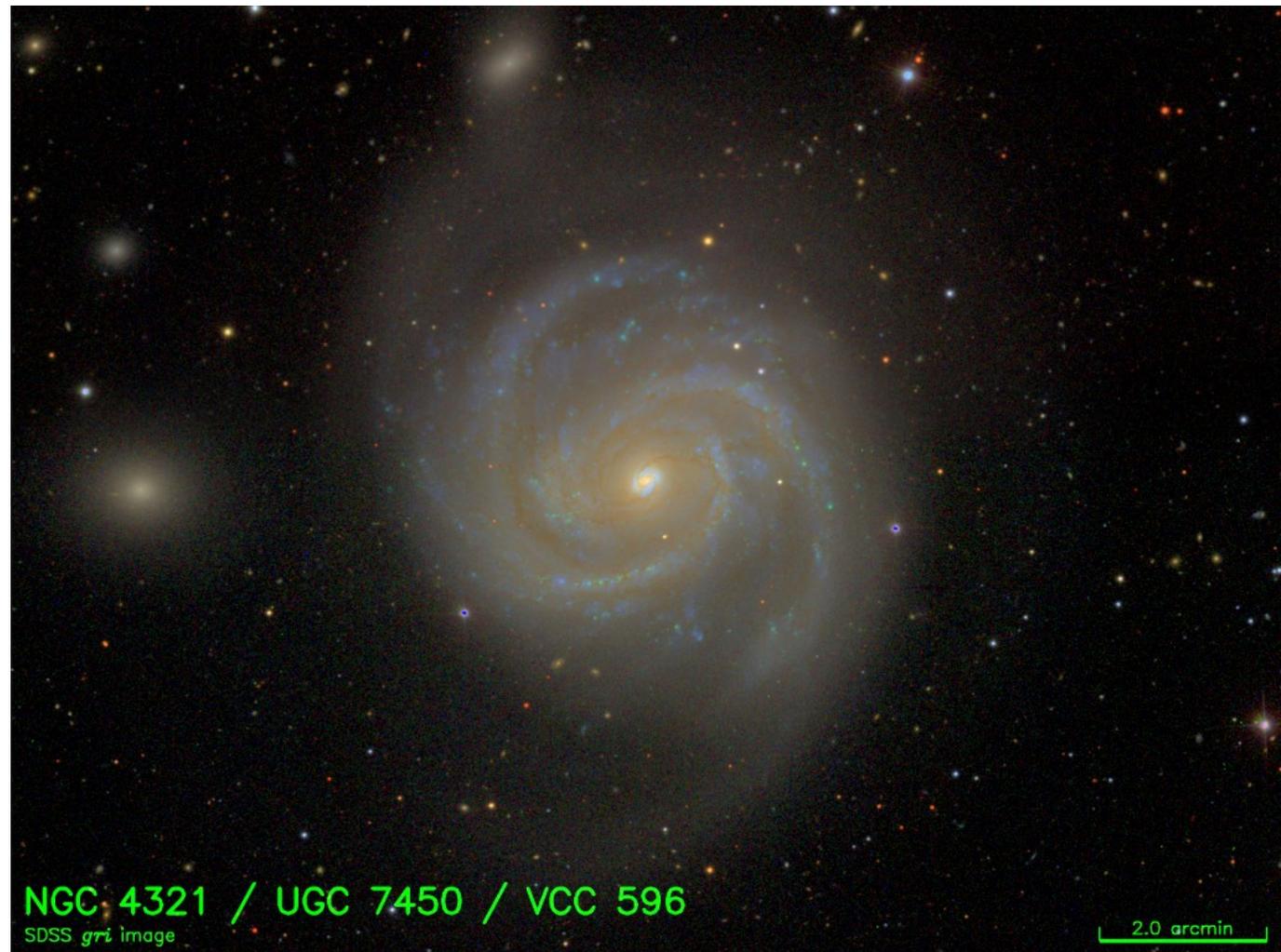


$$V_{\text{rot}}^2 \sim GM/R$$

e como $M/\pi R^2 \sim \text{Cte}$ temos que $M = k V_{\text{rot}}^4$. Ademais temos ainda que $M=fL$ e portanto

$$L \sim k V_{\text{rot}}^4$$

Galáxias espirais de diferentes tipos seguem esta relação como boa precisão. As relações observadas atualmente são:



$$M_B \sim -11,0 \text{ Log } V_{\text{rot}} \text{ (km/s)} + 3,31 \quad \text{Sc}$$

$$M_B \sim -10,2 \text{ Log } V_{\text{rot}} \text{ (km/s)} + 2,71 \quad \text{Sb}$$

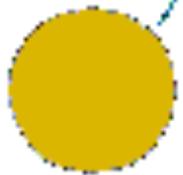
$$M_B \sim -9,95 \text{ Log } V_{\text{rot}} \text{ (km/s)} + 3,15 \quad \text{Sa}$$

As galáxias mais distantes que observamos atualmente podem ter a sua distância estimada através das supernovas do tipo Ia.

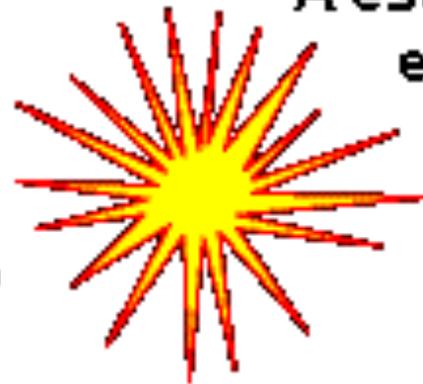


Uma fina camada de hidrogênio se acumula na superfície da anã branca devido à acreção

camada superficial
Anã Branca

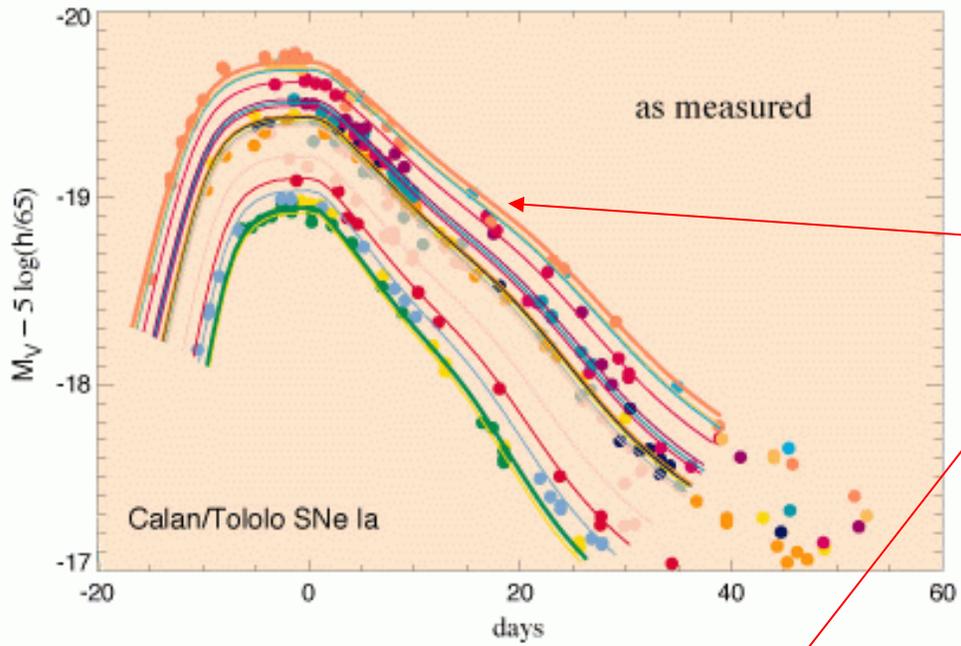


Explosão do gás degenerado na superfície se propaga por toda a estrela

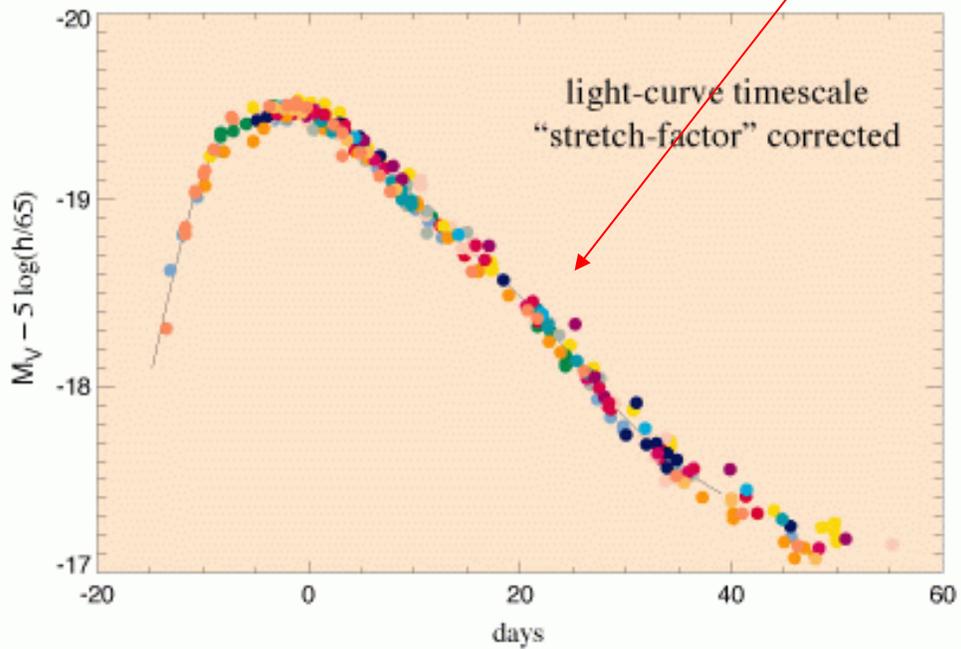
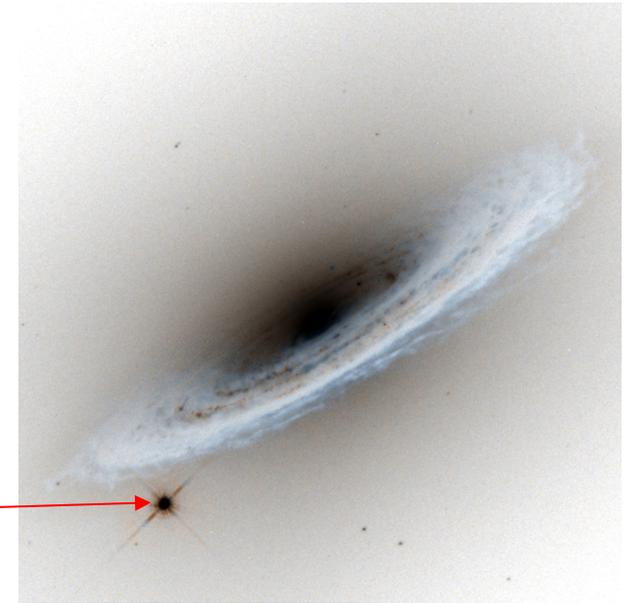


A estrela se consome em uma grande explosão

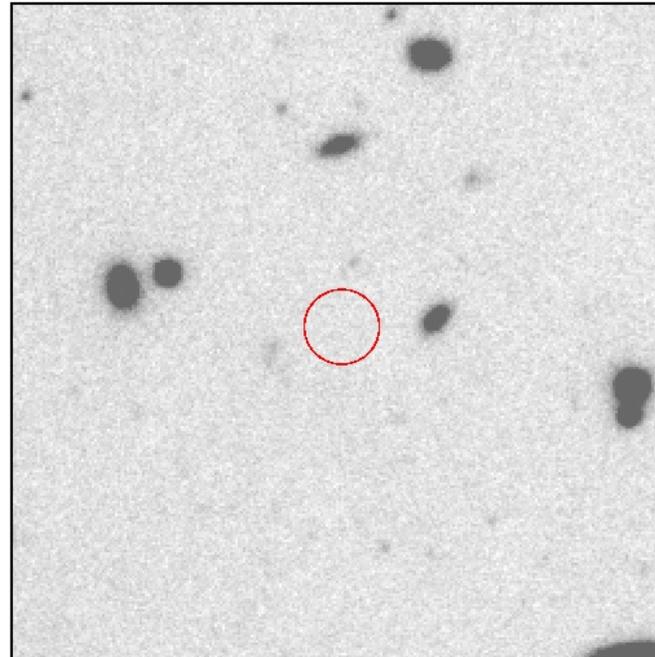
V Band



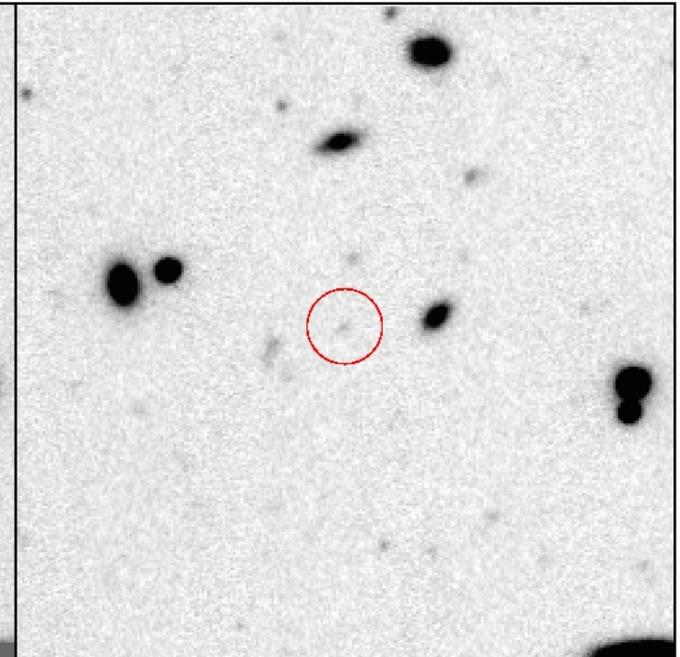
Curva de luz composta



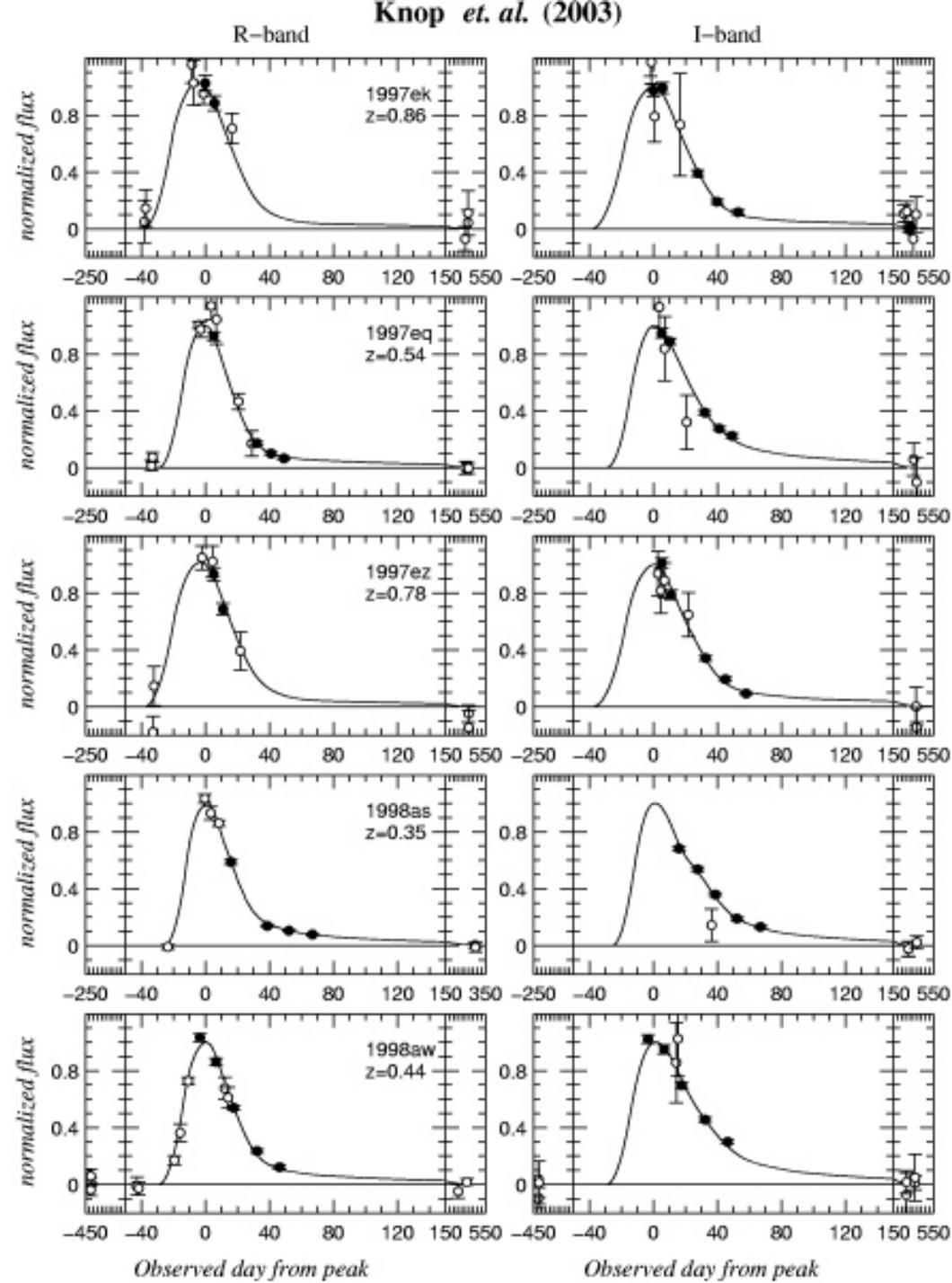
CFHT OCT. 3, 1999



CFHT NOV. 4, 1999



Como as supernovas Ia são eventos muito brilhantes é possível observá-las e testar as propriedades geométricas do Universo, como por exemplo a sua curvatura prevista pela teoria da relatividade geral.

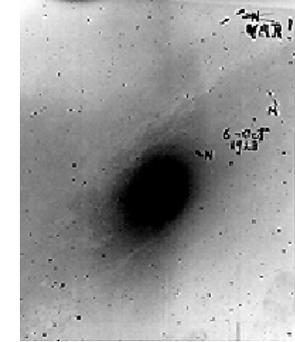
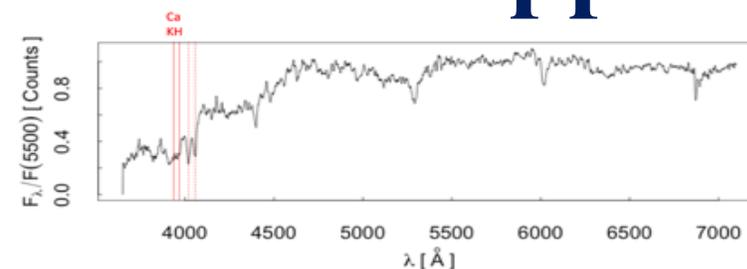


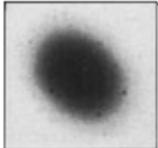
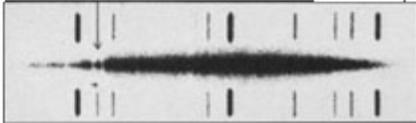
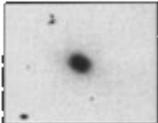
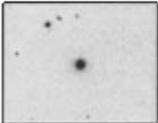
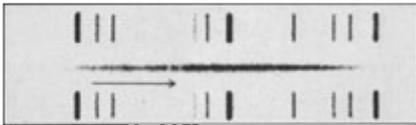
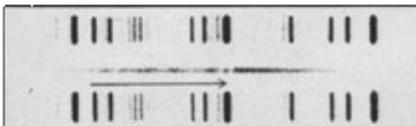
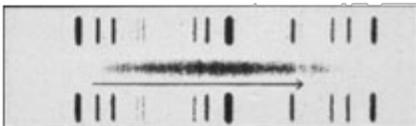
O redshift

$$z = (\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0) / \lambda_0$$

das galáxias e se relaciona com a com a distância dos objetos. A primeira interpretação de Hubble, incorreta, era que isto se devia à velocidade de afastamento causada pelo efeito Doppler

$$V = c z$$



Cluster nebula in	Distance in light-years	Redshifts
 Virgo	78 000 000	 H+K 1 200 km s ⁻¹
 Ursa Major	1 000 000 000	 15 000 km s ⁻¹
 Corona Borealis	1 400 000 000	 22 000 km s ⁻¹
 Bootes	2 500 000 000	 39 000 km s ⁻¹
 Hydra	3 960 000 000	 61 000 km s ⁻¹

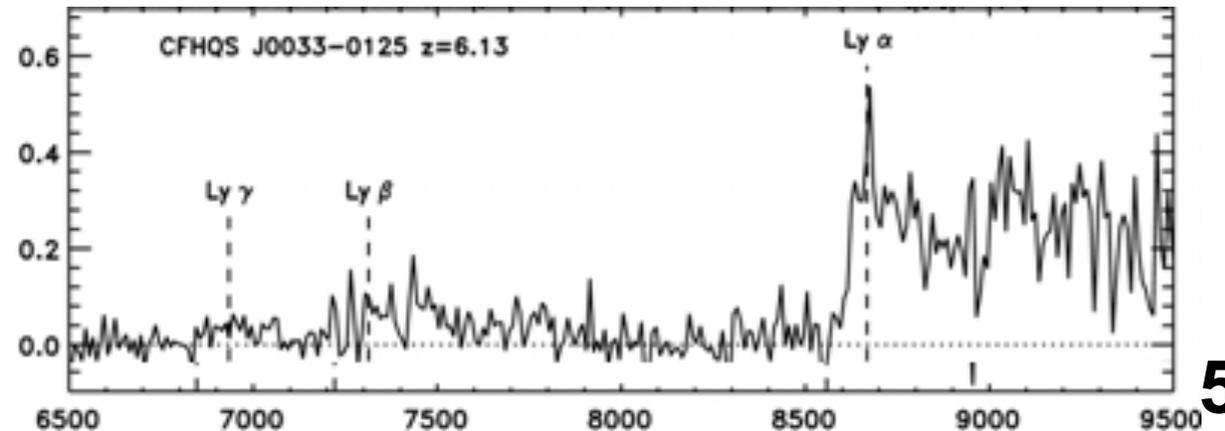
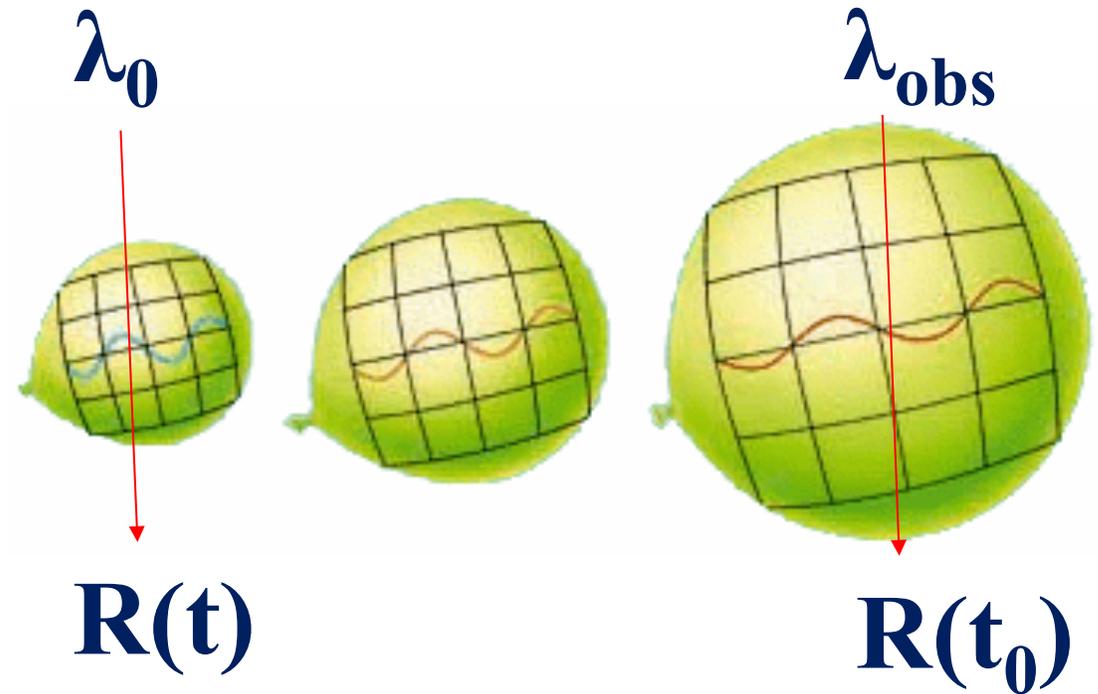
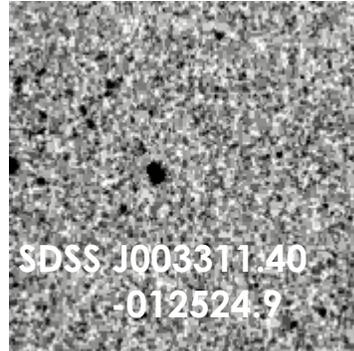
A interpretação deste fenômeno, segundo a teoria da relatividade geral, é que o espaço-tempo está inflando ao longo da evolução do Universo. Este efeito, na componente espacial da métrica, é medido pelo fator de escala $R(t)$. O valor atual deste fator de escala é definido como sendo $R(t_0)=1$, onde t_0 é a idade atual do Universo. Resulta que o comprimento de onda do fóton cosmológico cresce proporcionalmente ao fator de escala desde o momento em que ele foi emitido (t), com um comprimento de onda λ_0 ,

$$\lambda_{\text{obs}}/\lambda_0 = R(t_0)/R(t) = 1/R$$

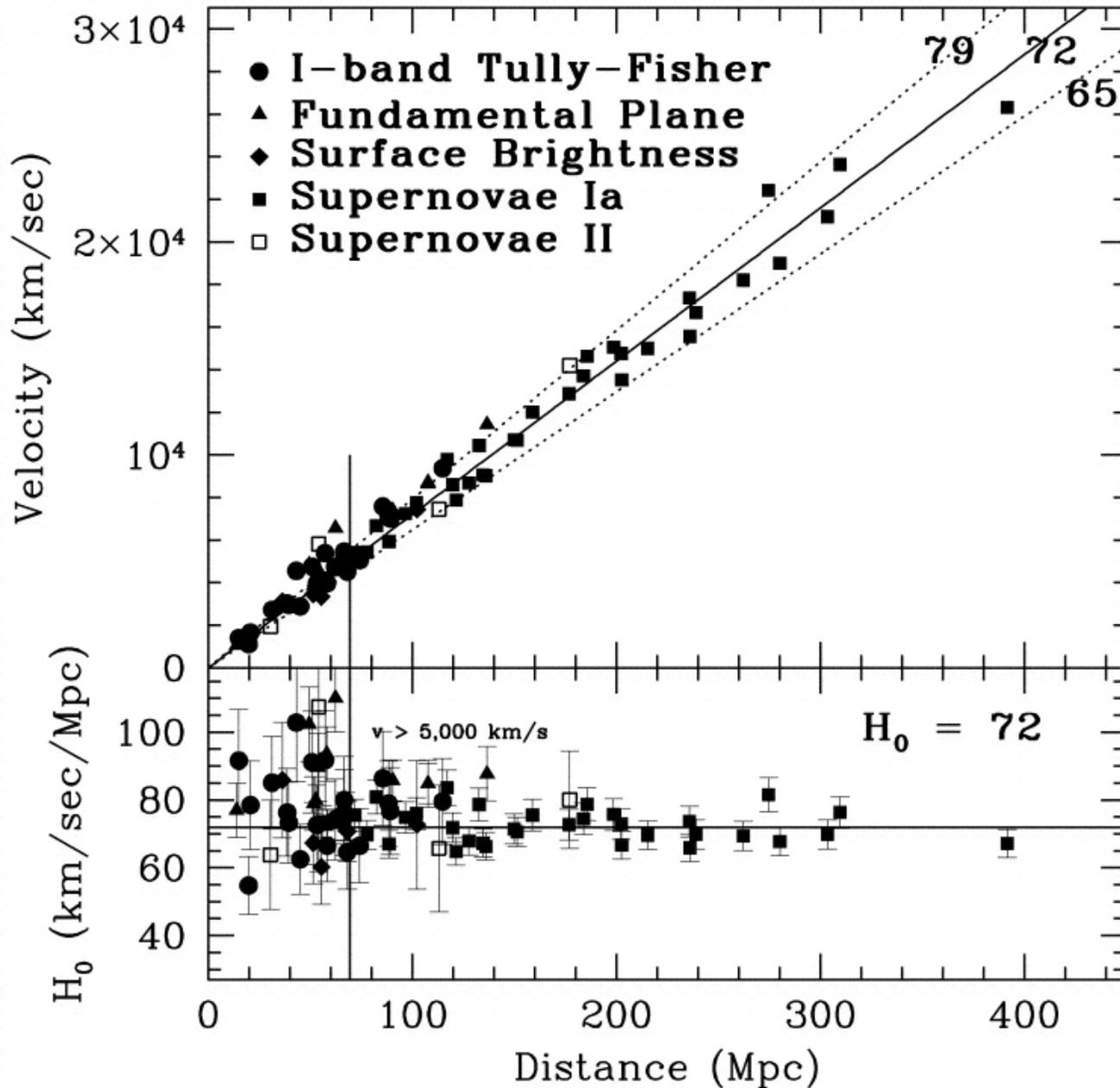
e portanto obtemos que

$$1+z = 1/R$$

mostrando que o redshift cosmológico mede na verdade o grau de expansão do espaço desde em que fóton foi emitido em uma galáxia distante até a sua detecção hoje.



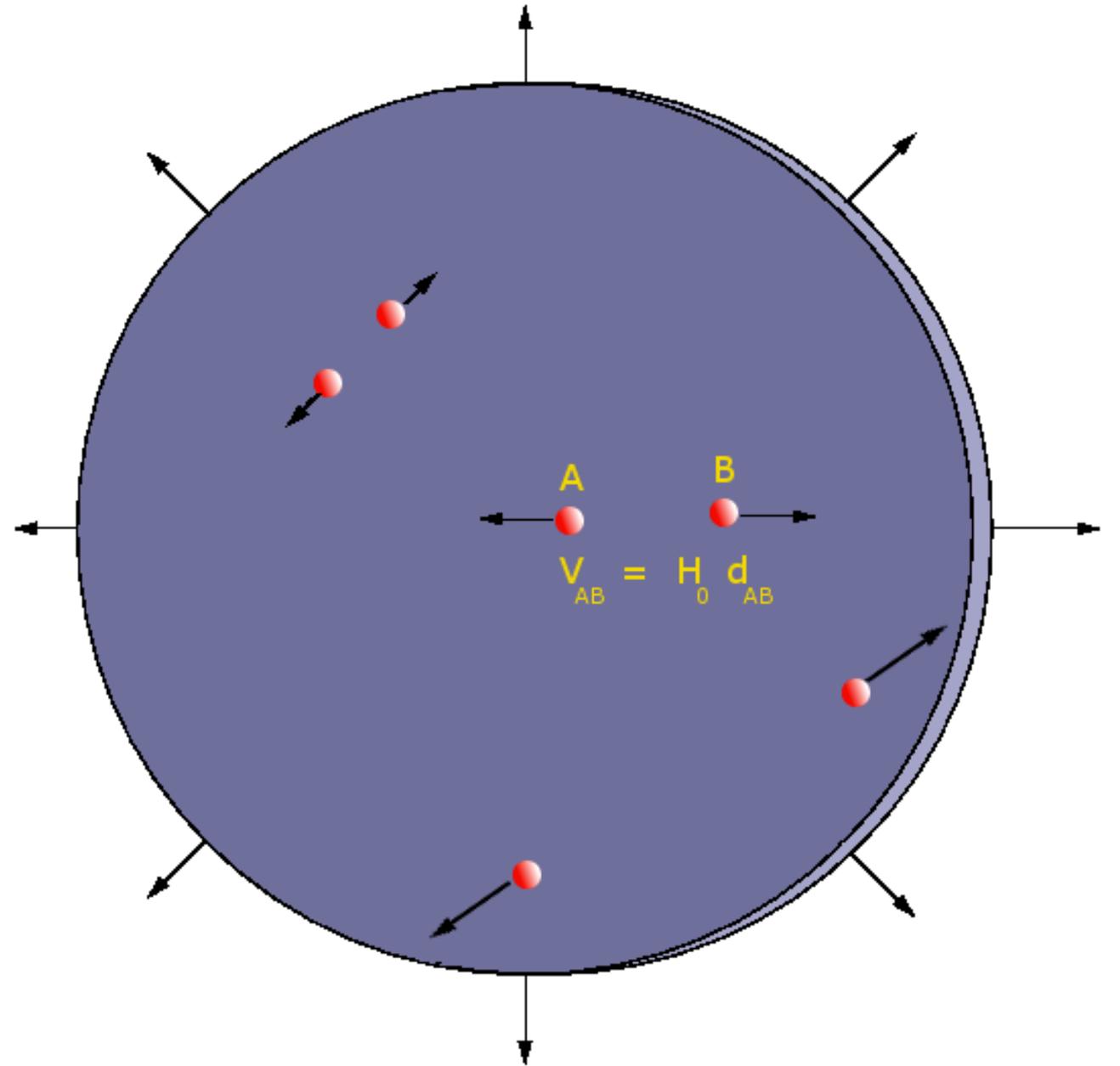
Como $V = H_0 d \Rightarrow dR/dt/R = H_0 \cong 70 \pm 6 \text{ km/s/Mpc}$



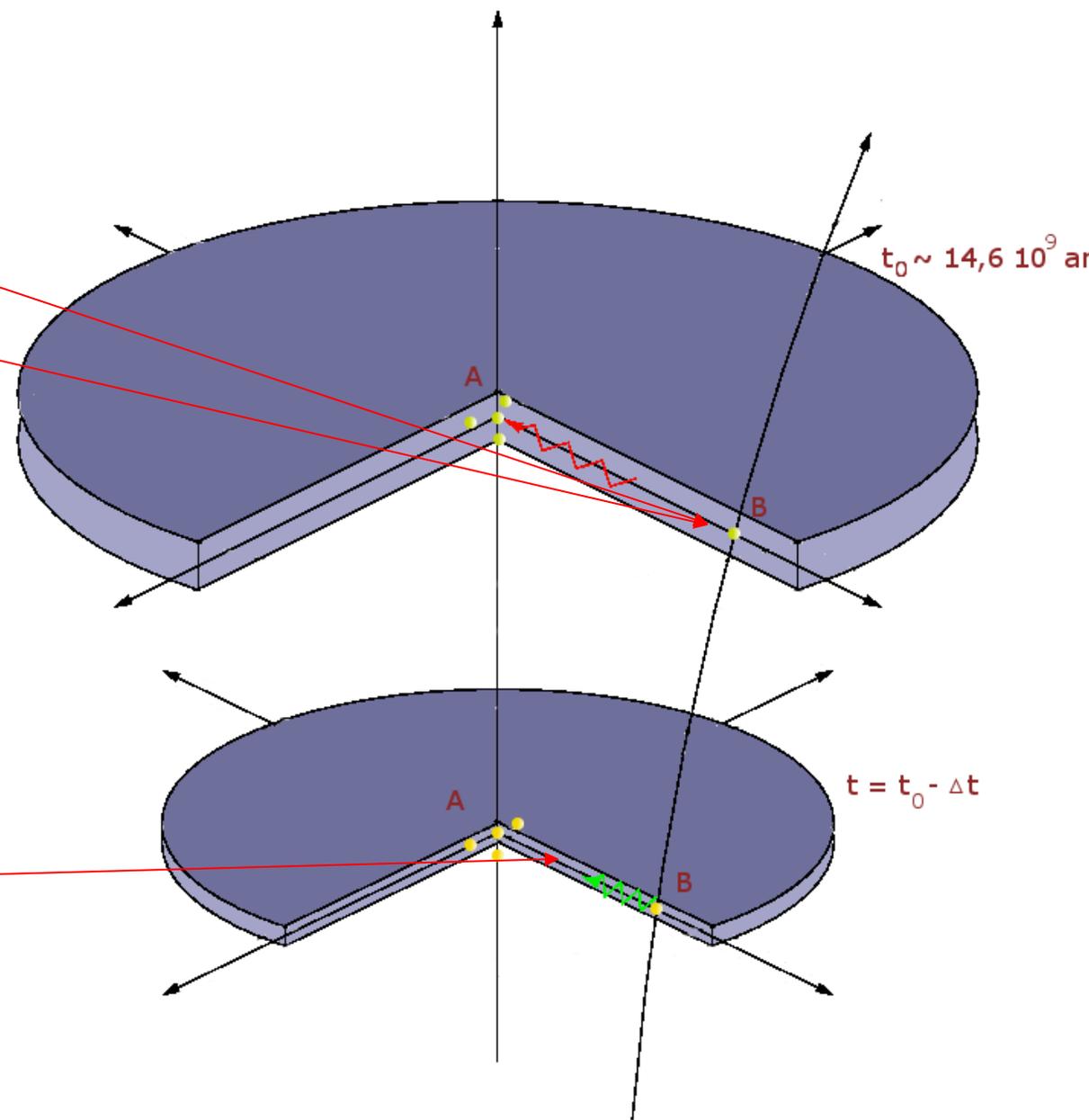
indicando que a taxa de variação do parâmetro de escala muda com o tempo e que podemos definir uma escala de tempo conhecida como a idade Hubble

$$t_H = 1/H_0 \cong 10^{10} \text{ anos}$$

Portanto, ao contrário do que pensava Hubble, não são as galáxias que se movimentam mas sim a própria estrutura do espaço-tempo que expande!



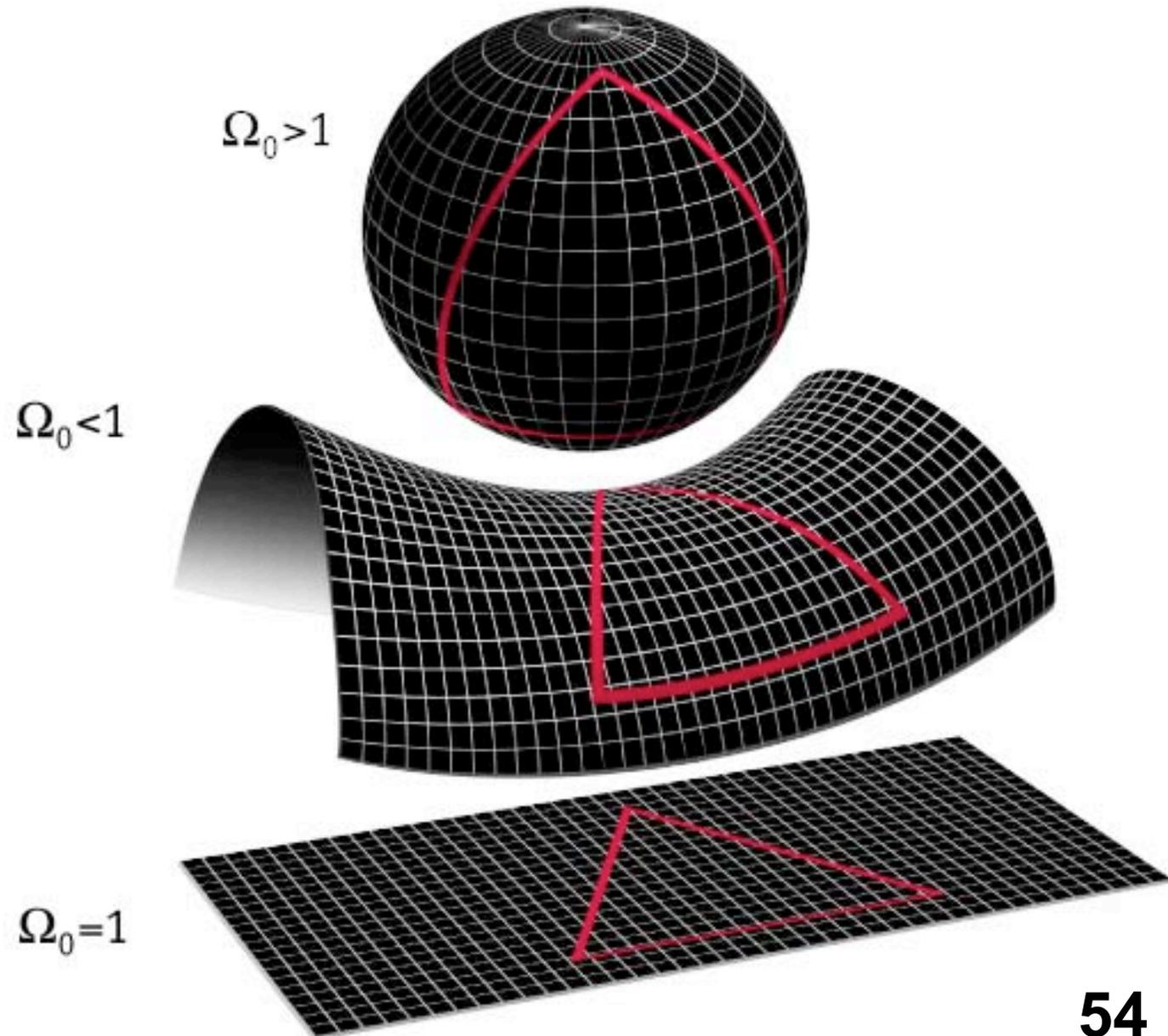
A separação $d_{AB}(t_0)$ é denominada de distância comóvel e tudo o que podemos fazer é observar o passado dos objetos vizinhos quando a nossa separação a eles era $d_{AB}(t_0 - \Delta t)$ e estimar a distância comóvel atual através de um modelo do Universo!



O parâmetro de densidade $\Omega_0 = \rho/\rho_{c0}$ mede a razão entre a densidade de matéria-energia (ρ) e a densidade crítica atual

$$\rho_{c0} = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

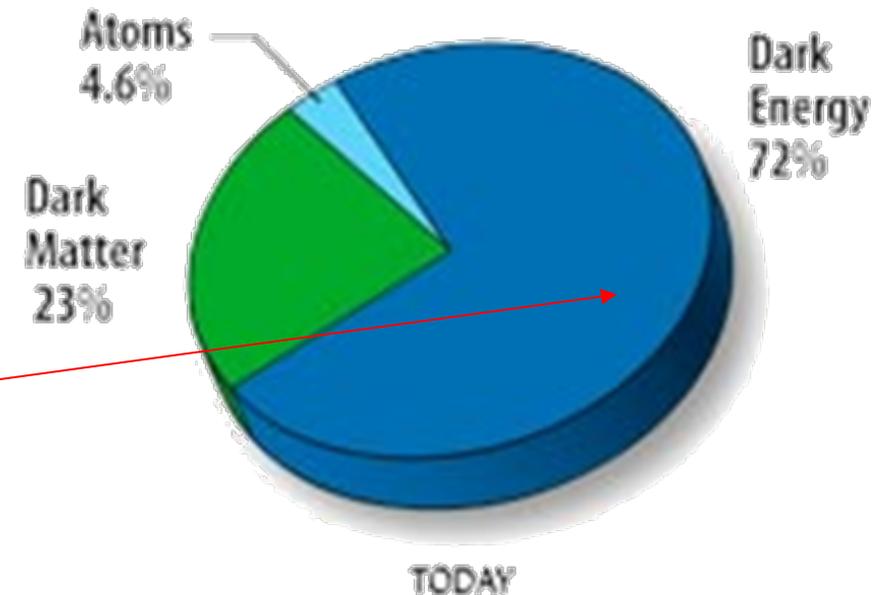
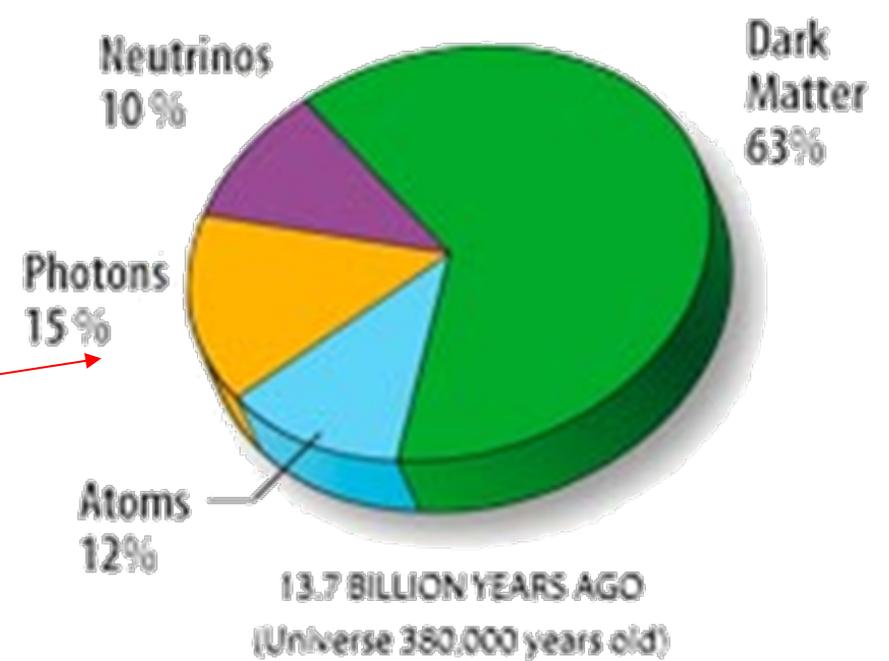
$\Omega_0 = 1$ é o modelo plano.



- ρ_{0M} é a densidade total de matéria bariônica + matéria escura e $\Omega_{0M} = \rho_{0M} / \rho_{0c} \cong 0,3$.

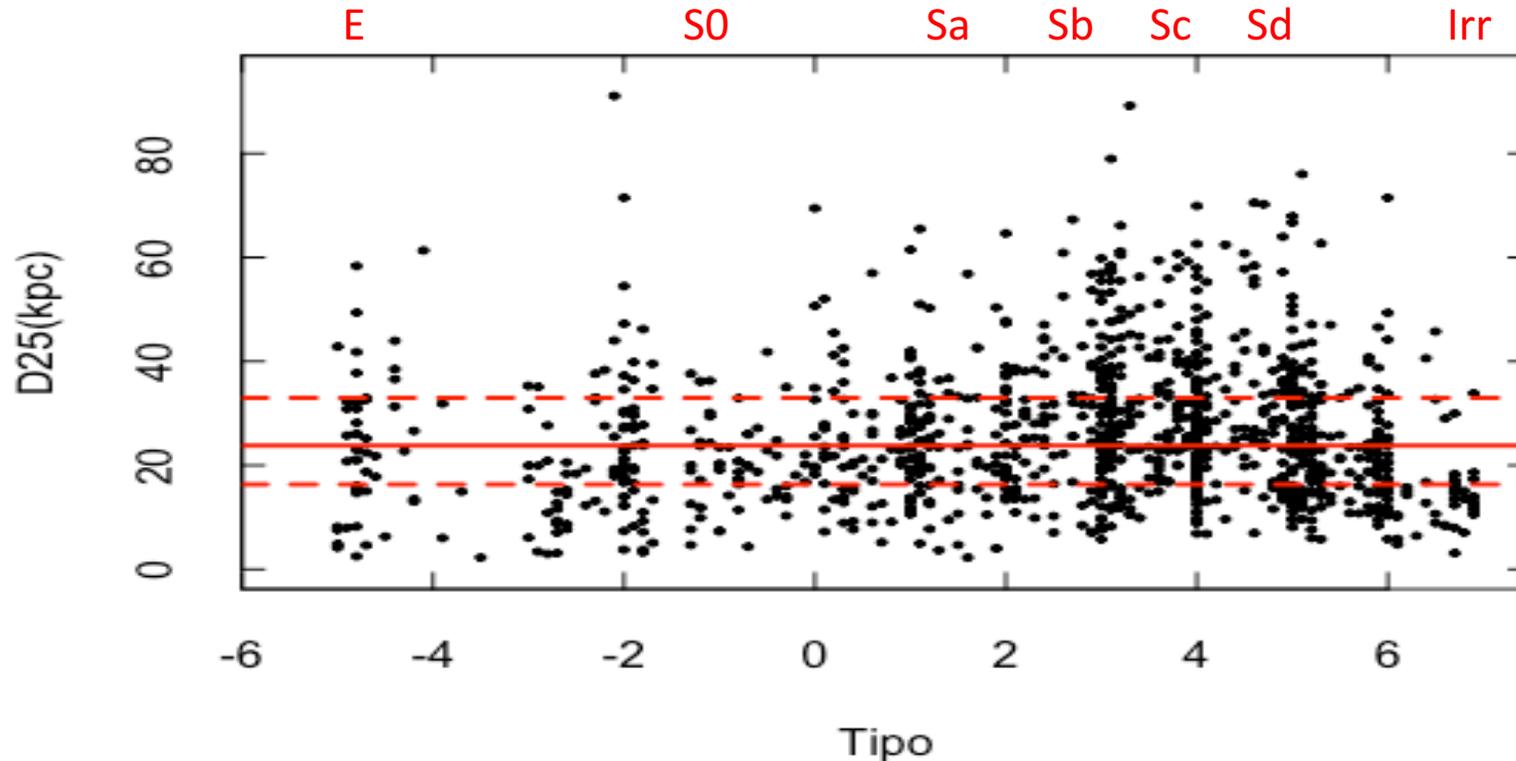
- ρ_{0R} é a densidade de radiação $\Omega_{0R} = \rho_{0R} / \rho_{0c} \cong 0,04$.

- A densidade atual da energia escura, Λ , e a sua contribuição é $\Omega_{0\Lambda} \cong 0,7$.

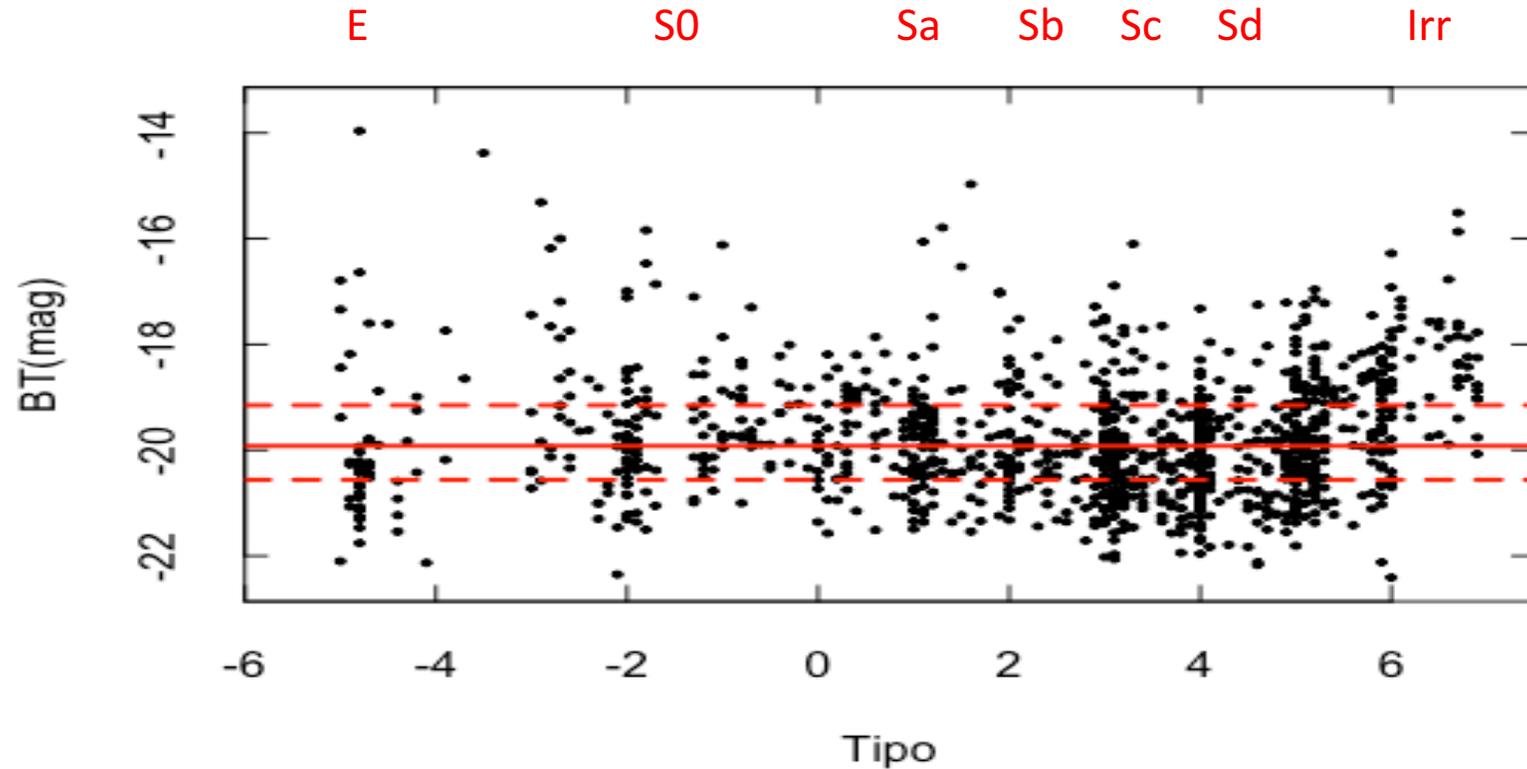


Várias propriedades das galáxias, como a dimensão $d \cong 30\text{-}40$ kpc, apresentam regularidades importantes que dependem do tipo morfológico.

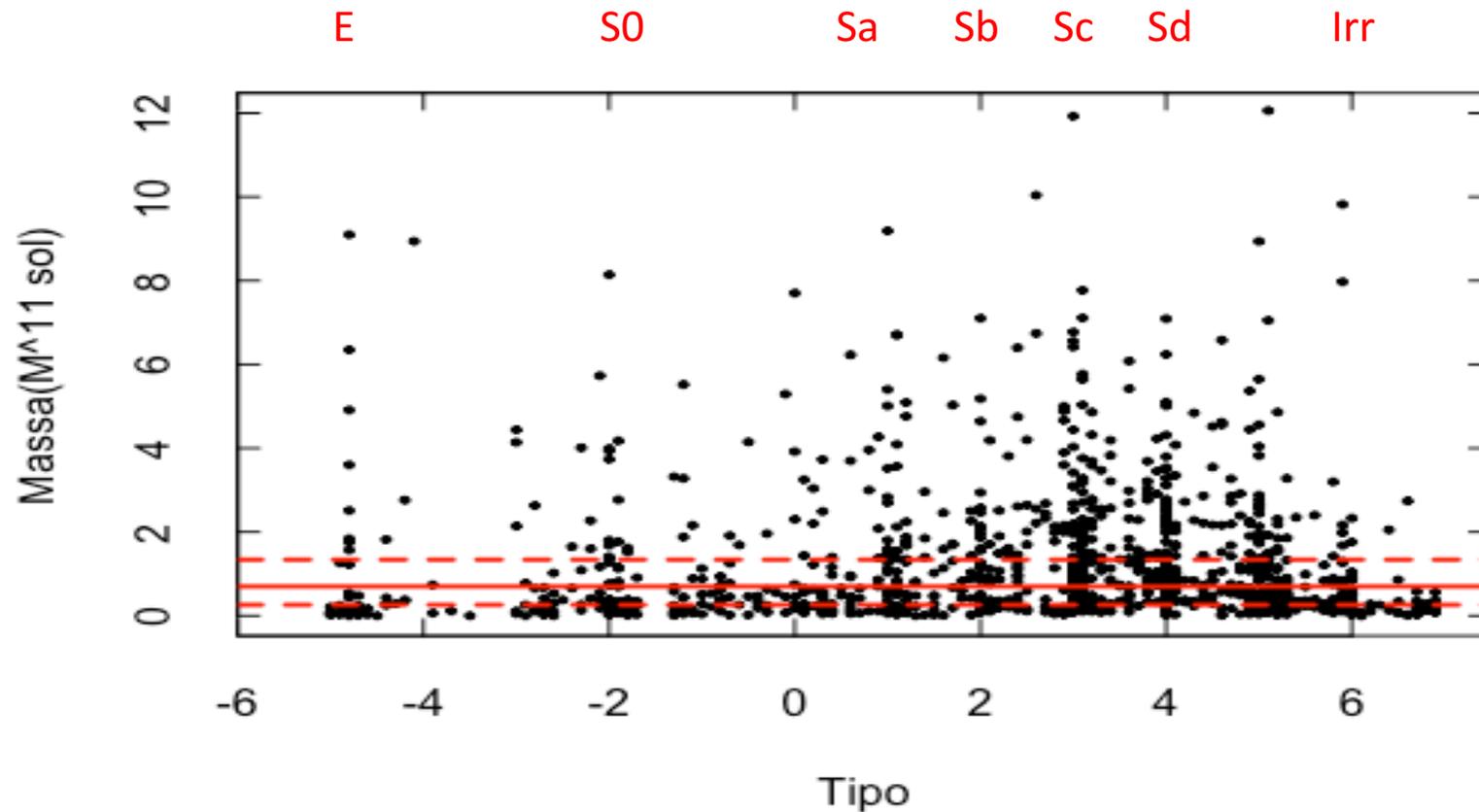
Propriedades gerais



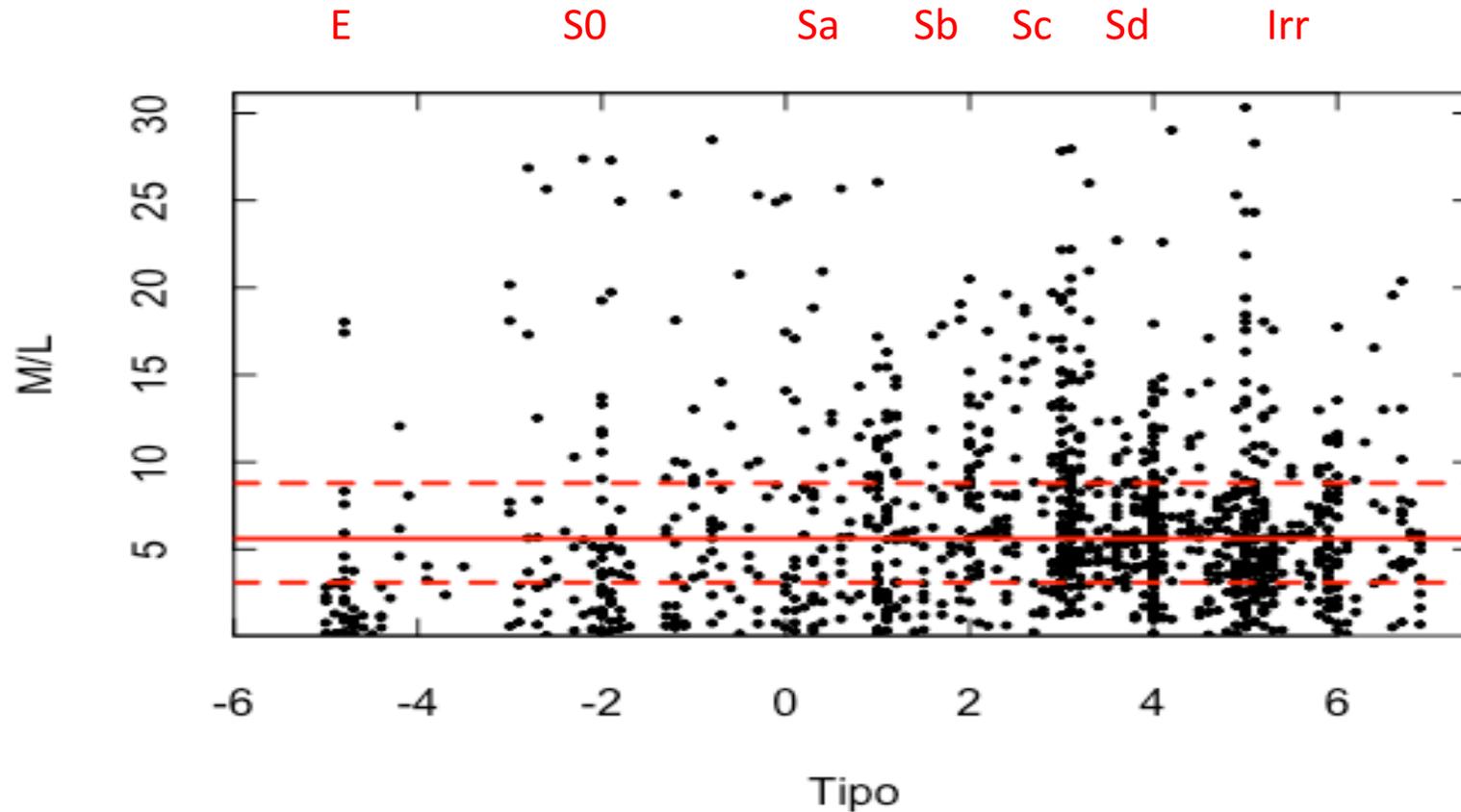
Quantas estrelas temos em uma galáxia com $M_B = -20,5$? $M_{\text{abs}}(B) - B_{\odot} = -2,5 \text{ Log } N$ e como $B_{\odot} = 5,48$ uma galáxia deve ter cerca de 2×10^{10} estrelas como o Sol!



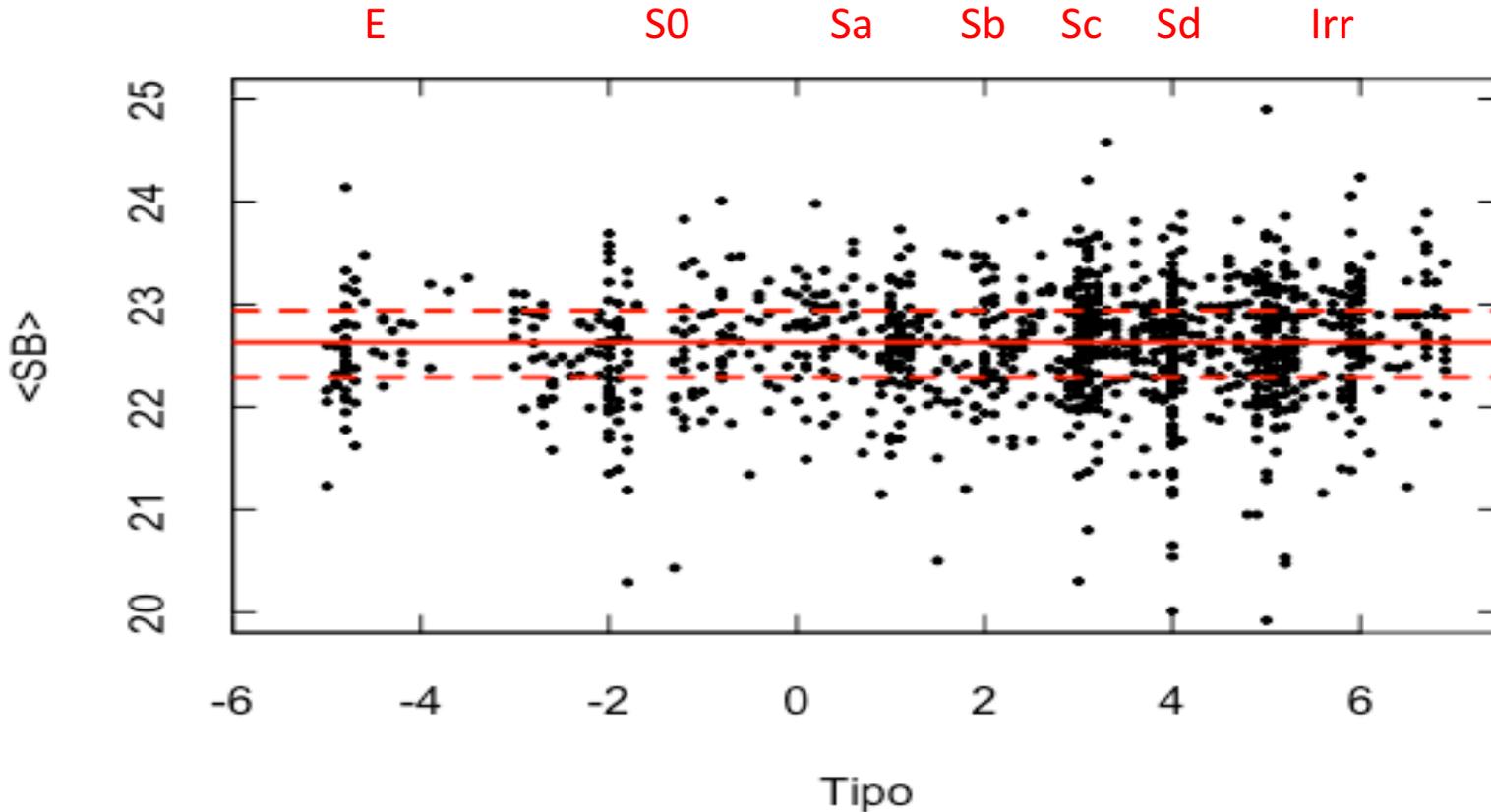
Nas espirais as observações em 21cm indicam que $M \cong V_{\text{rot}}^2 R/G$ e a massa se situa na faixa $(1-3) \times 10^{11} M_{\odot}$.



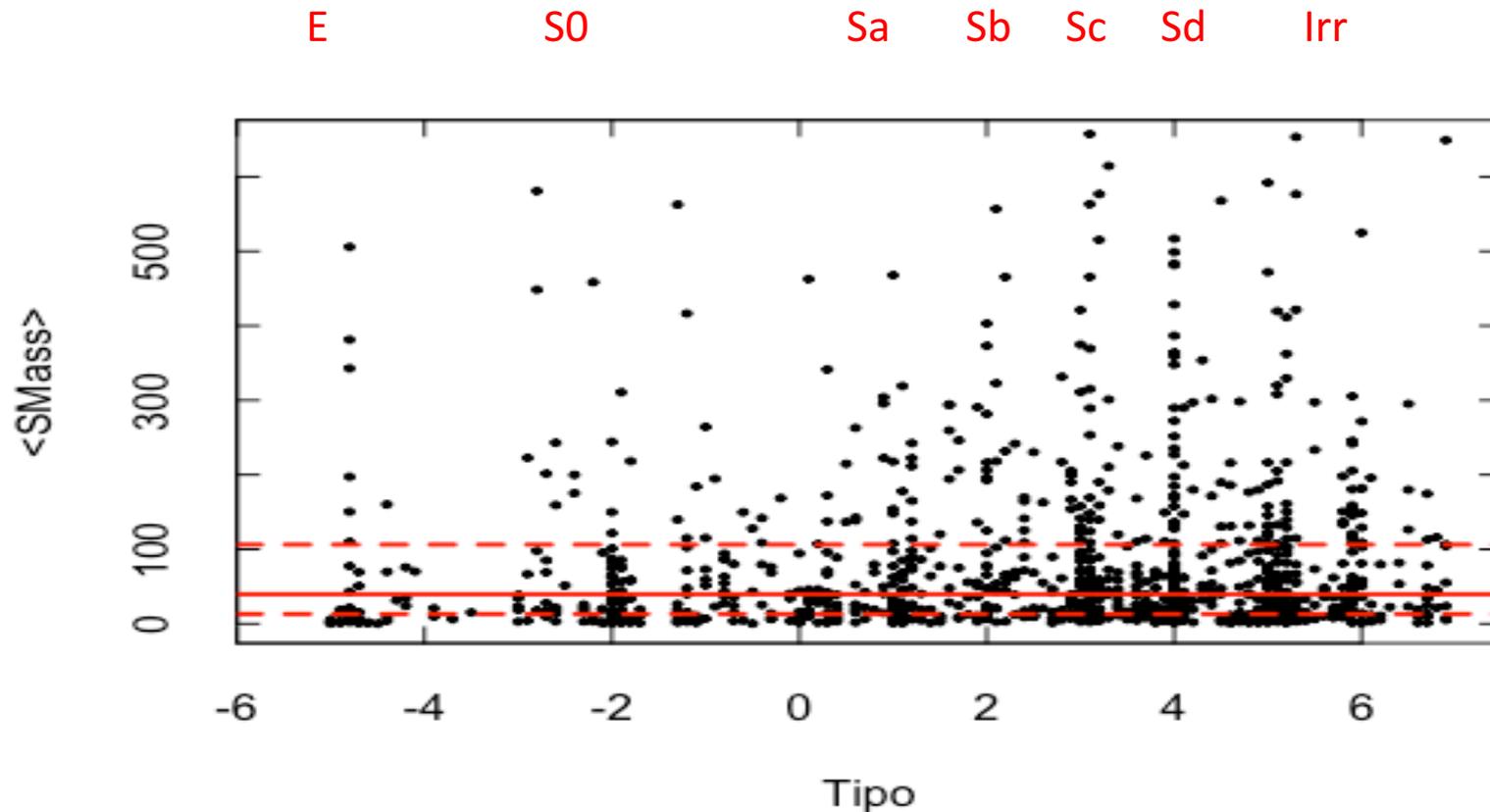
A razão massa-luminosidade em unidades solares é definida como $f = M/M_{\odot}/L/L_{\odot} \cong 5 M_{\odot}/L_{\odot}$.



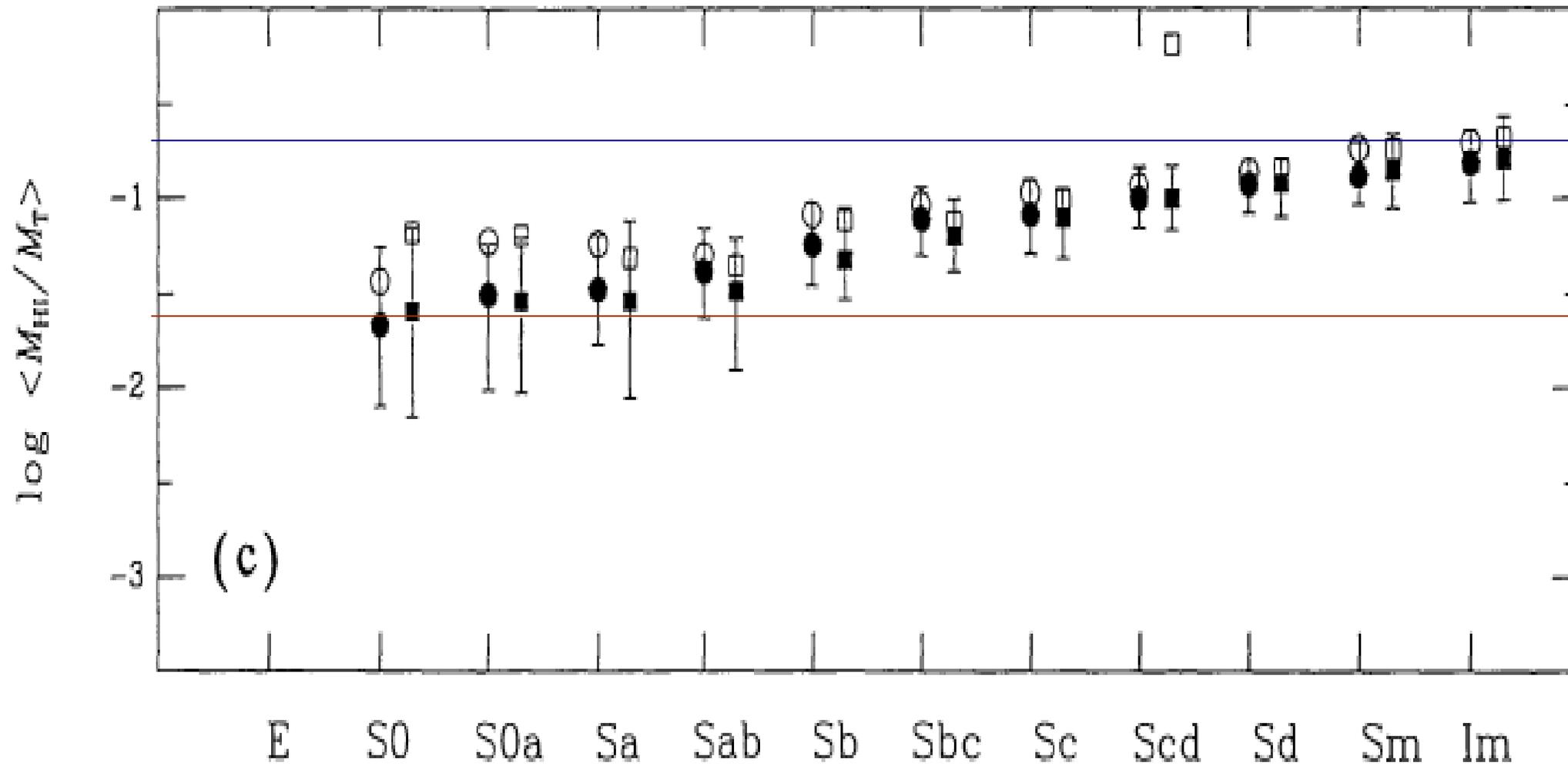
O brilho superficial médio, $\Sigma = -2,5 \text{Log}(4L/\pi ab)$ na isofota de 25 mag/□” indica um brilho superficial médio 22,69 mag/□” onde a e b são os diâmetros.



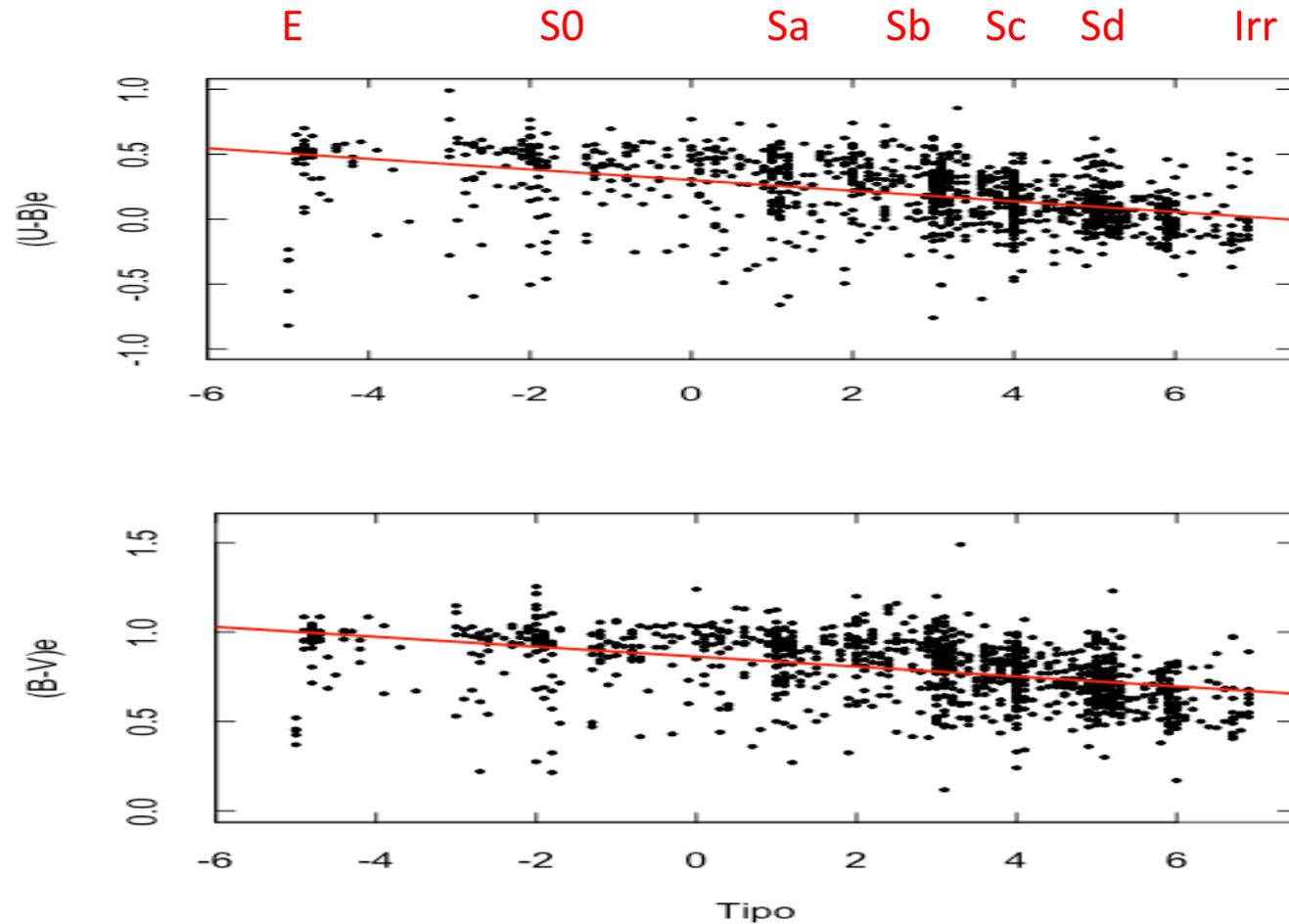
A densidade superficial de massa, $\sigma_T=4M_T/\pi ab$, em massas solares por pc^2 , indica que $\sigma_T \cong 100 M_\odot/\text{pc}^2$.

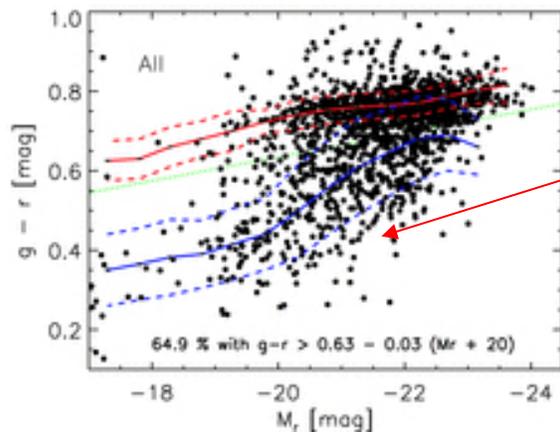
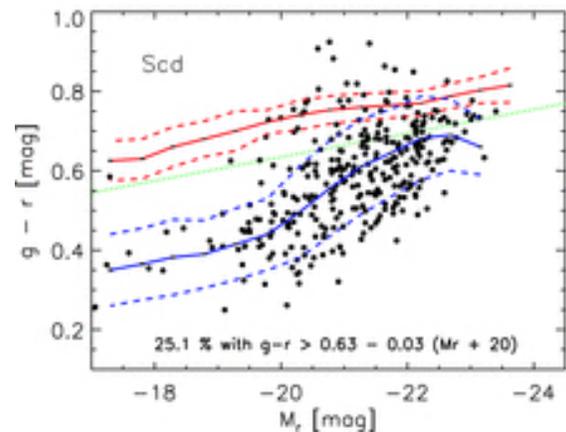
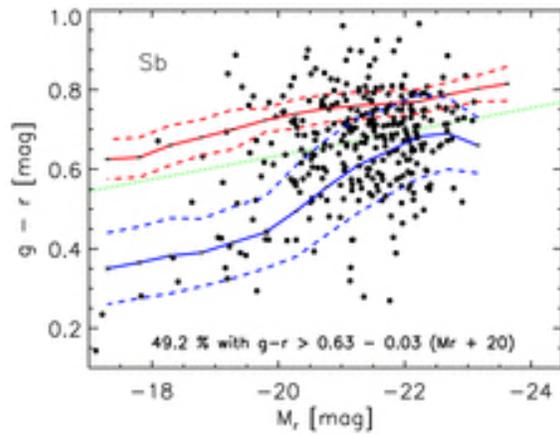
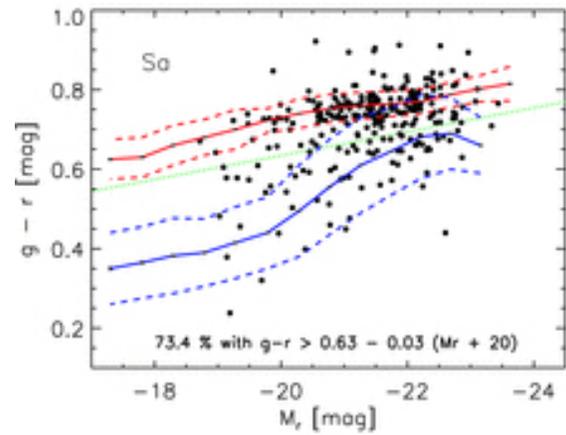
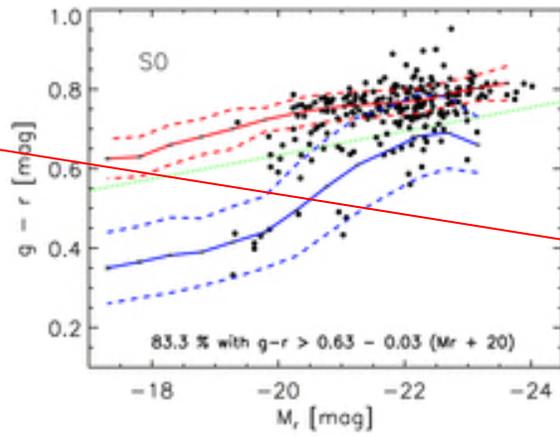
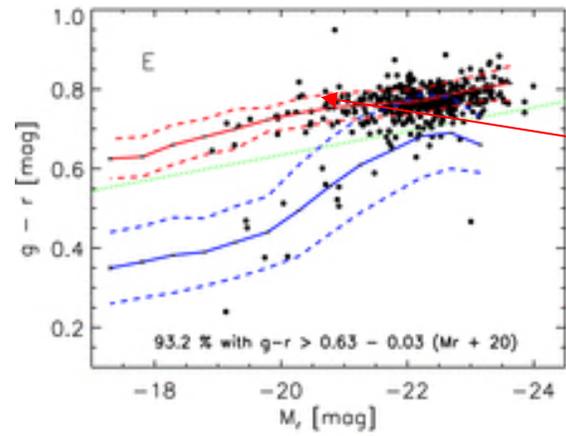


As galáxias S0,Sa apresentam uma fração de gás da ordem de $M_{\text{HI}}/M_{\text{T}} \cong 2\%$ enquanto nas espirais tardias esta fração é da ordem de 10%.



Nas E,S0 a população estelar atual é mais velha e o índice de cor $B-V \cong 1,0$. Nas espirais do tipo tardio o índice de cor é bem mais azulado e $B-V \cong 0,6$.

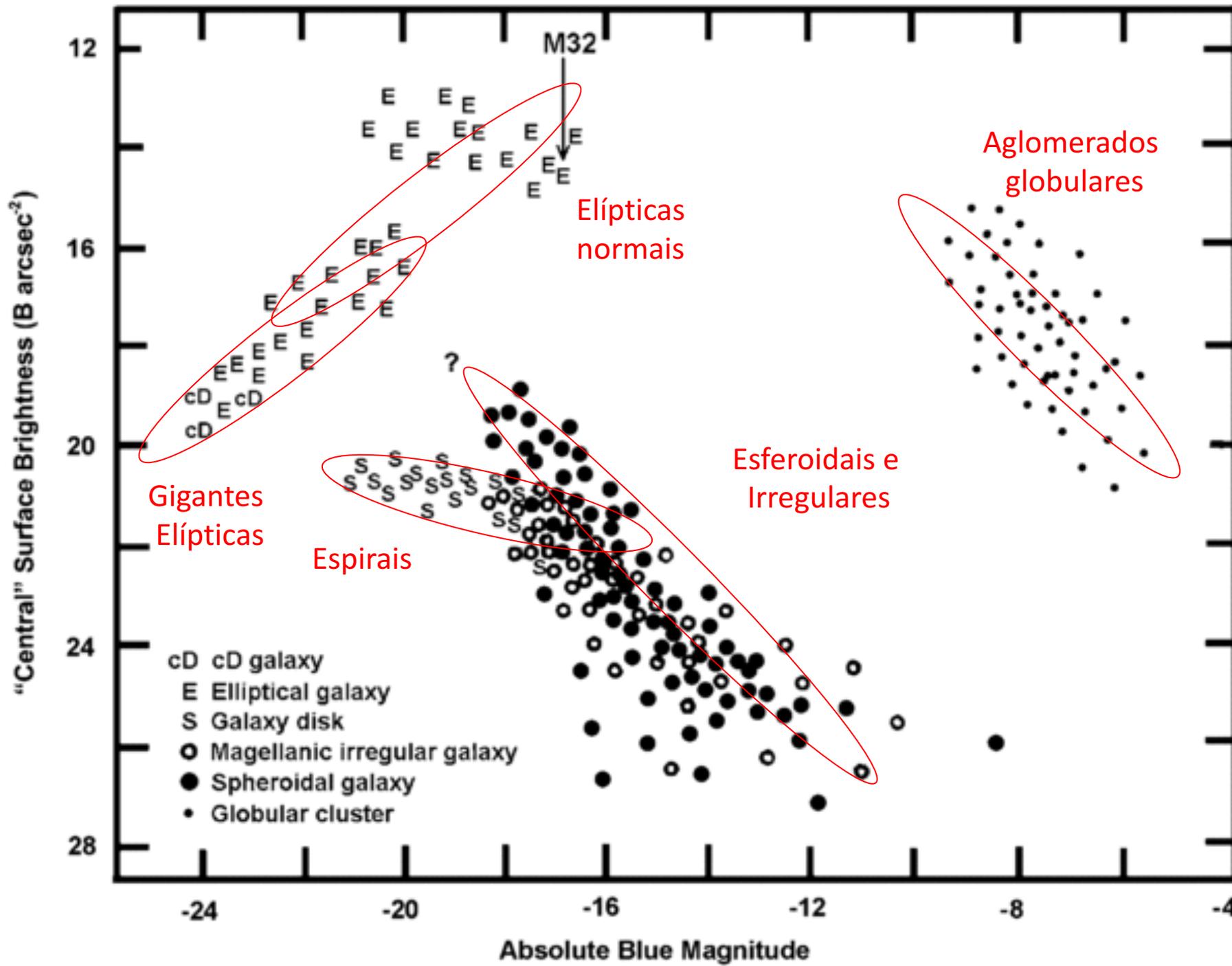




Na amostra do SDSS podemos observar uma sequência vermelha povoada basicamente pelos objetos de tipo jovem (E,S0). Já a sequência azul é dominada pelas galáxias de tipos espirais mais tardios.

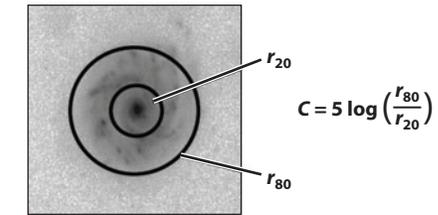
Quais são as questões fundamentais?

- **Como se formaram as galáxias?**
- **Como explicar as suas diferenças morfológicas?**
- **Como identificar os parâmetros observacionais mais relevantes?**
- **Existem evidências de evolução entre as diversas classes morfológicas?**

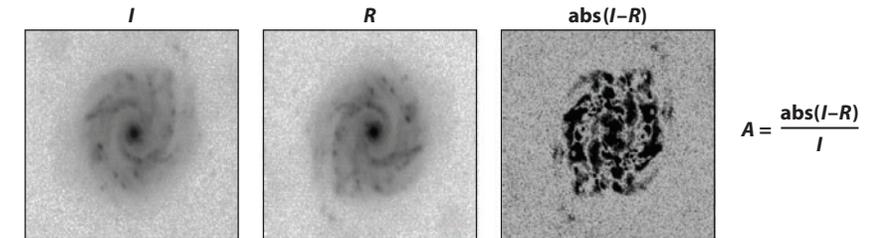


Recentemente Conselice (2014, ARAA, 52, 291) apresentou uma revisão indicando as tendências atuais sobre o tema da classificação morfológicas em galáxias observáveis até $z=6$. Dada a dificuldade de aplicar diretamente os conceitos da classificação de Hubble a um número muito grande de objetos a ideia consiste em adotar métodos não-paramétricos para quantificar estatisticamente a distribuição de brilho das galáxias. Os parâmetros mais promissores citados atualmente são:

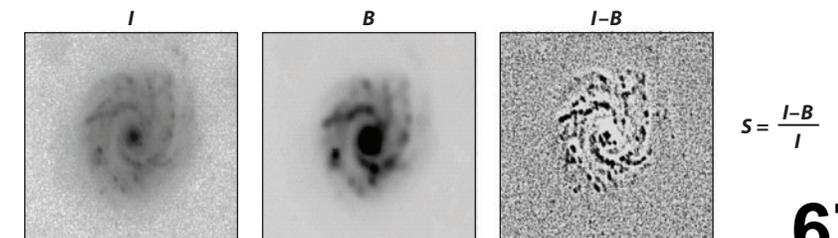
C- Concentração: medida pela distribuição dos raios de
 Pretrossian $\eta = I(r)/\langle i \rangle \quad \eta=20, 80$

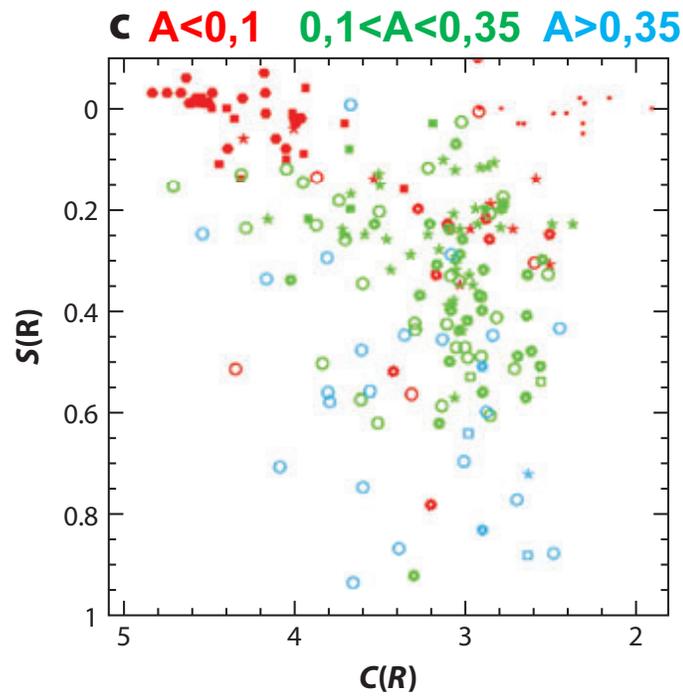
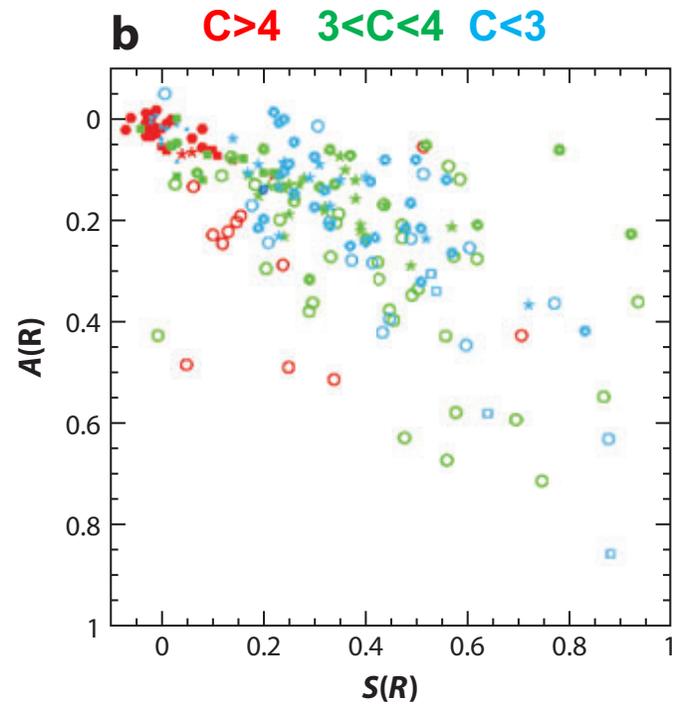
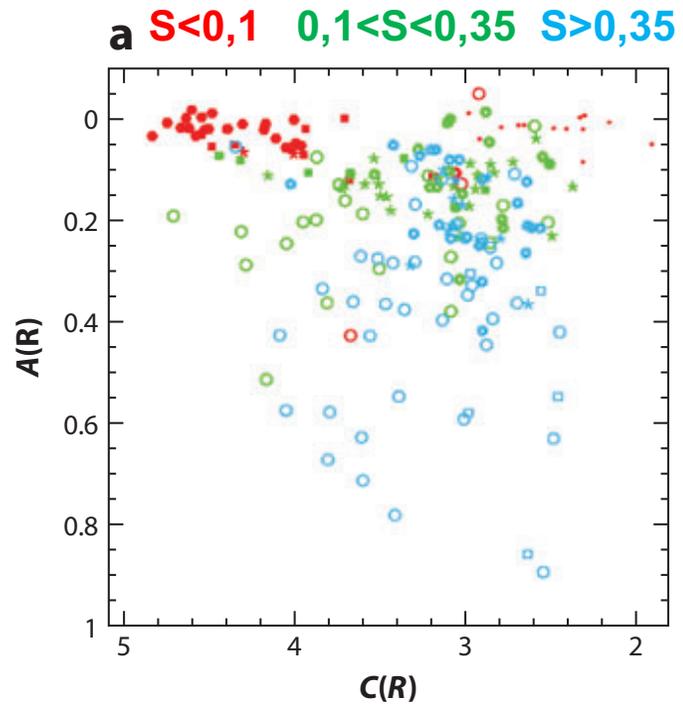


A- Assimetria: medida entre a diferença do valor absoluto
 entre a imagem observada (I) e a imagem rotacionada de 180° (R)



S- Granulação(Clumpiness): medida entre a diferença entre
 a imagem observada (I) e a imagem rotacionada de 180° (R)





- Giant ellipticals/S0s
- Early-type spirals
- * Late-type spirals
- ◆ Irregulars
- Dwarf ellipticals
- ◻ Starbursts
- ULIRGs

Como usar estes indicadores para selecionar os membros de um conjunto de galáxias de interesse específico?

Evolução Fotométrica



Mesmo com as dúvidas que persistem atualmente é evidente que as galáxias se formaram da contração de nuvens primordiais de gás. A partir daí a formação estelar se iniciou determinando as suas características futuras. A descrição da evolução da população estelar de uma galáxia é um tema fundamental para entendermos as observações em altos redshift. No entanto no momento dispomos apenas de um modelo muito simplificado. Neste modelo a evolução fotométrica deve depender de duas funções básicas (i) a função inicial de massa (IMF) que determina o número relativo de estrelas que se formam em cada intervalo de massa; (ii) a taxa de formação estelar (dM_*/dt) que informa qual a quantidade total de massa convertida em estrelas por unidade de tempo. Na falta de um modelo baseado em princípios fundamentais a hipótese mais simples consiste em supor que a taxa de formação estelar segue uma relação ad hoc do tipo

$$dM_*/dt = M_g/\tau$$

onde M_g representa a massa da gás presente na galáxia em um dado momento. Se fizermos a suposição que a massa total se mantém constante ($M_T = M_* + M_g$) obtemos

$$dM_*/dt = (M_T - M_*)/\tau$$

sendo fácil mostrar que a solução desta equação é

$$M_* = M_T [1 - \exp(-t/\tau)]$$

O resultado final é que a taxa de formação estelar instantânea deve decrescer exponencialmente ao longo do tempo

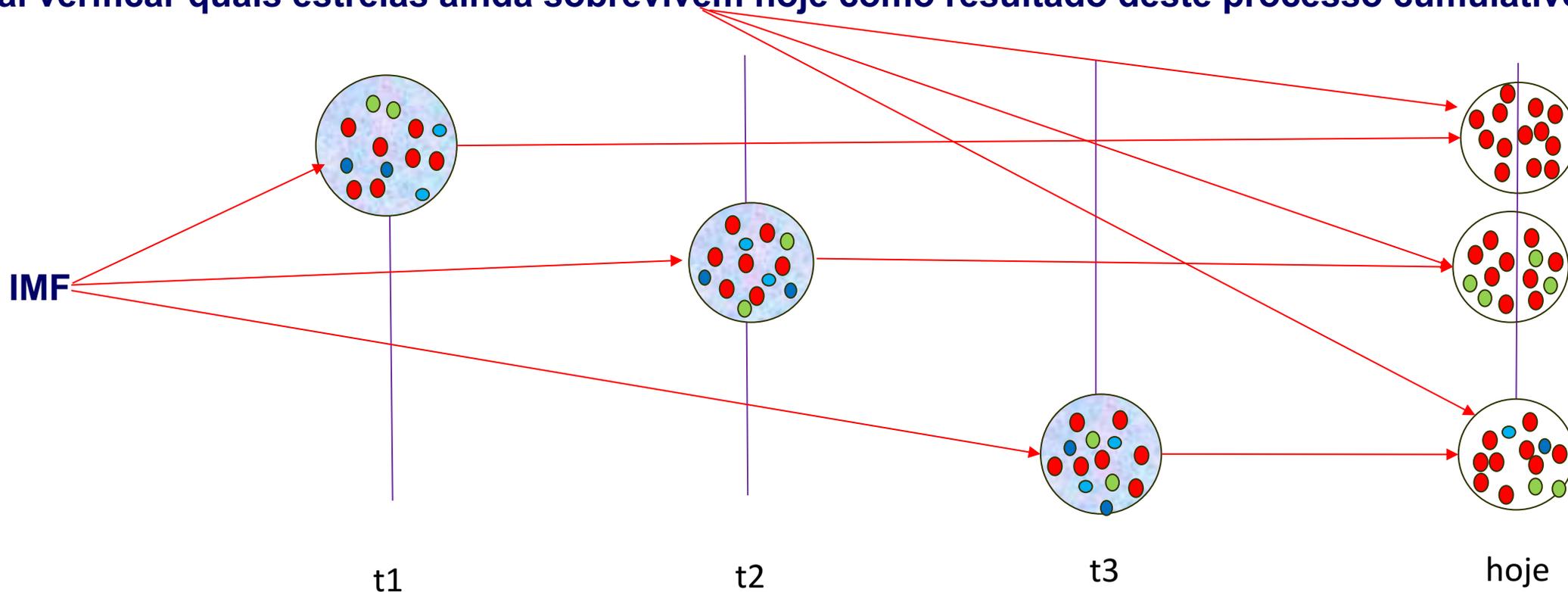
$$dM_*/dt = M_*/\tau \exp(-t/\tau)$$

Podemos considerar que este resultado, extremamente simplista, é motivado pela concepção de que a taxa de formação estelar era certamente bem maior no passado quando a massa de gás era mais abundante. Neste caso o fator τ funciona como uma escala de tempo para consumo do gás para formar estrelas. Certamente sabemos que a evolução da taxa de formação de estrelas deve ser muito mais complexa do que esta expressão simplificada. Mas, ainda assim, esta expressão contém o ingrediente básico para uma primeira abordagem deste problema. Sabemos pela observação de objetos distantes que a taxa de formação estelar era certamente bem mais elevada no passado. Portanto a escala de tempo τ pode nos dar pistas de como ocorreu a diferenciação da população estelar das galáxias em função do tipo morfológico.

Para a função inicial de massa, ou IMF, as observações dos aglomerados estelares galácticos, cujas estrelas surgiram praticamente ao mesmo tempo no passado recente da nossa Galáxia, indicam que a hipótese mais simples consiste em adotar uma distribuição em lei de potência

$$dN(m_*)/dm_* = -A m_*^{-\alpha}$$

sendo $2,1 < \alpha < 3,2$. O valor preferido por vários autores é $\alpha = 2,45$ que corresponde à chamada IMF de Salpeter e a taxa de formação estelar. A figura abaixo mostra como calcular a evolução das cores, devido ao envelhecimento da população estelar, de um aglomerado obedecendo a esta IMF de Salpeter ([1973, ApJ, 179, 427](#)). Para construir um modelo evolutivo basta calcular quantas estrelas se formaram em cada instante e no final verificar quais estrelas ainda sobrevivem hoje como resultado deste processo cumulativo.



Na figura abaixo temos um exemplo simples desse tipo de cálculo aplicado para estimar a cor de um único aglomerado formado no passado remoto da Galáxia. Cada ponto da curva contínua indica qual seria hoje o valor do índice de cor B-V. A curva tracejada mostra o índice de cor dos aglomerados globulares e abertos observados. Como se vê, apesar da simplicidade do modelo, é possível utilizá-lo com sucesso para explicar como deve ter ocorrido a evolução fotométrica desses objetos.

Para compor um modelo das galáxias basta diversas populações de aglomerados com diferentes idades e seguindo as indicações desenvolvidas anteriormente.

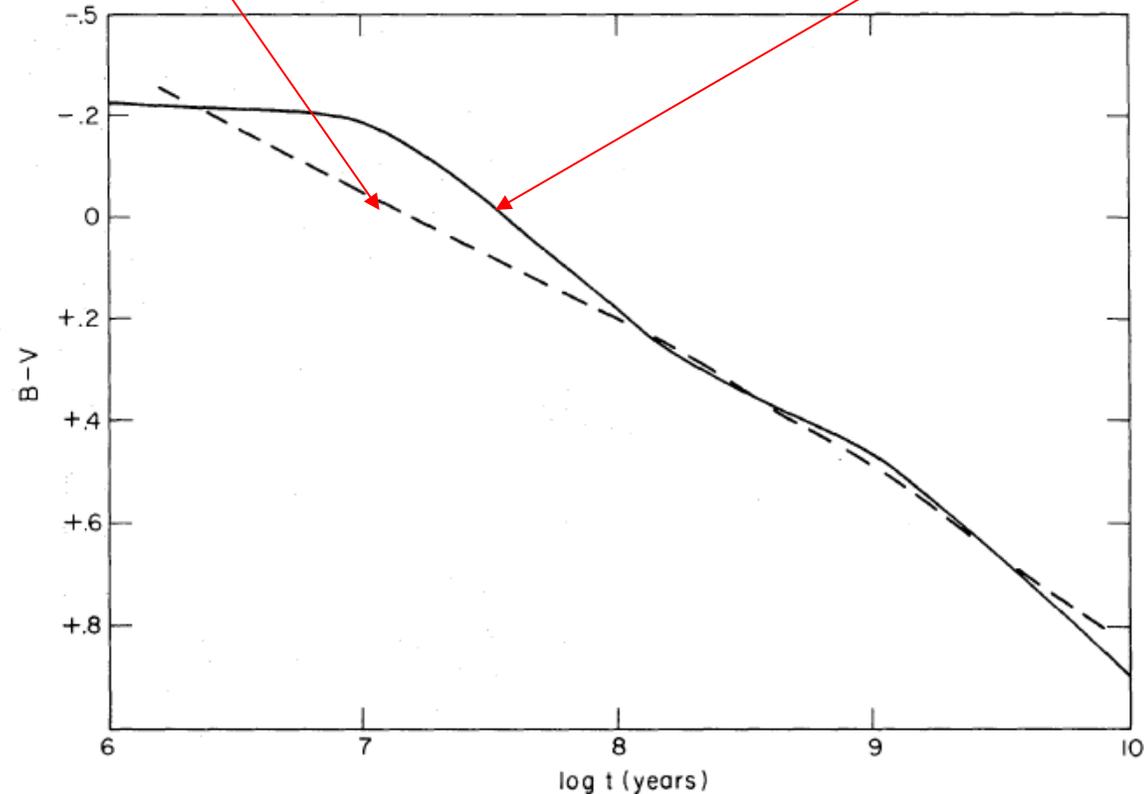


FIG. 1.—The integrated intrinsic $B - V$ color of star clusters as a function of age. *Solid line*, the computed relation from table 1 for the Salpeter case ($\alpha = 2.45$). *Dashed line*, the mean relation defined by observation of open star clusters taken from Sandage (1963).

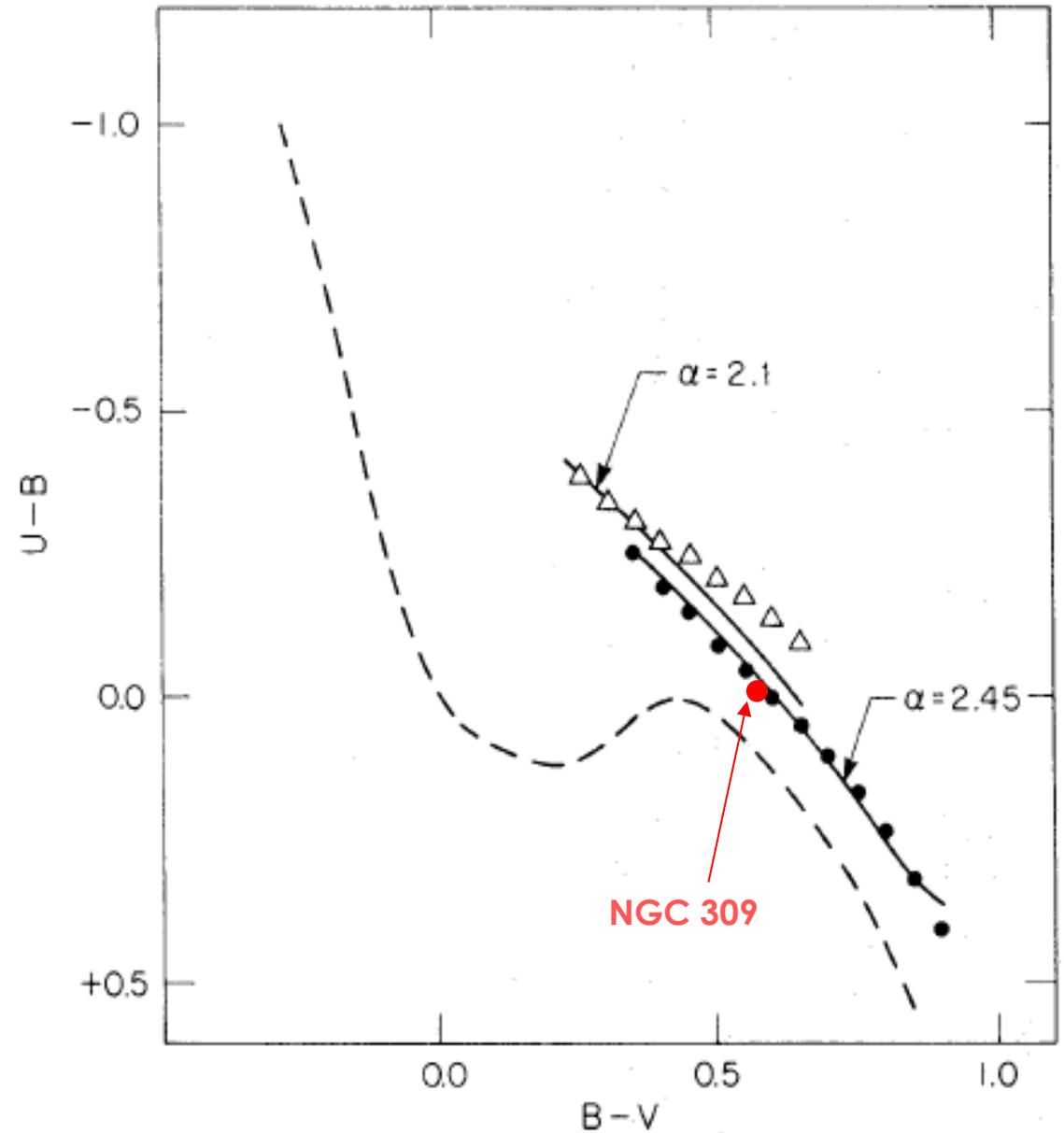
Como visto antes uma galáxia, observada hoje, pode ser tratada como uma soma de vários aglomerados estelares formados em diferentes instantes no passado. A figura ao lado mostra o cálculo das cores de uma galáxia, com idade de 10^{10} anos utilizando as ideias acima (1973, ApJ, 179, 427). Os triângulos indicam a posição das galáxias Irregulares e os pontos as galáxias Sc. A linha tracejada indica a posição das estrelas na seqüência principal com idade zero. A galáxia NGC 309 (Sc), por exemplo, tem $B-V=0,56$ e $U-B=-0,07$ e de acordo com estes modelos seria bem descrita por uma IMF de Salpeter e uma taxa de formação estelar com escala de tempo $\tau \sim 5 \times 10^9$ anos.

$$\beta = 1/\tau$$

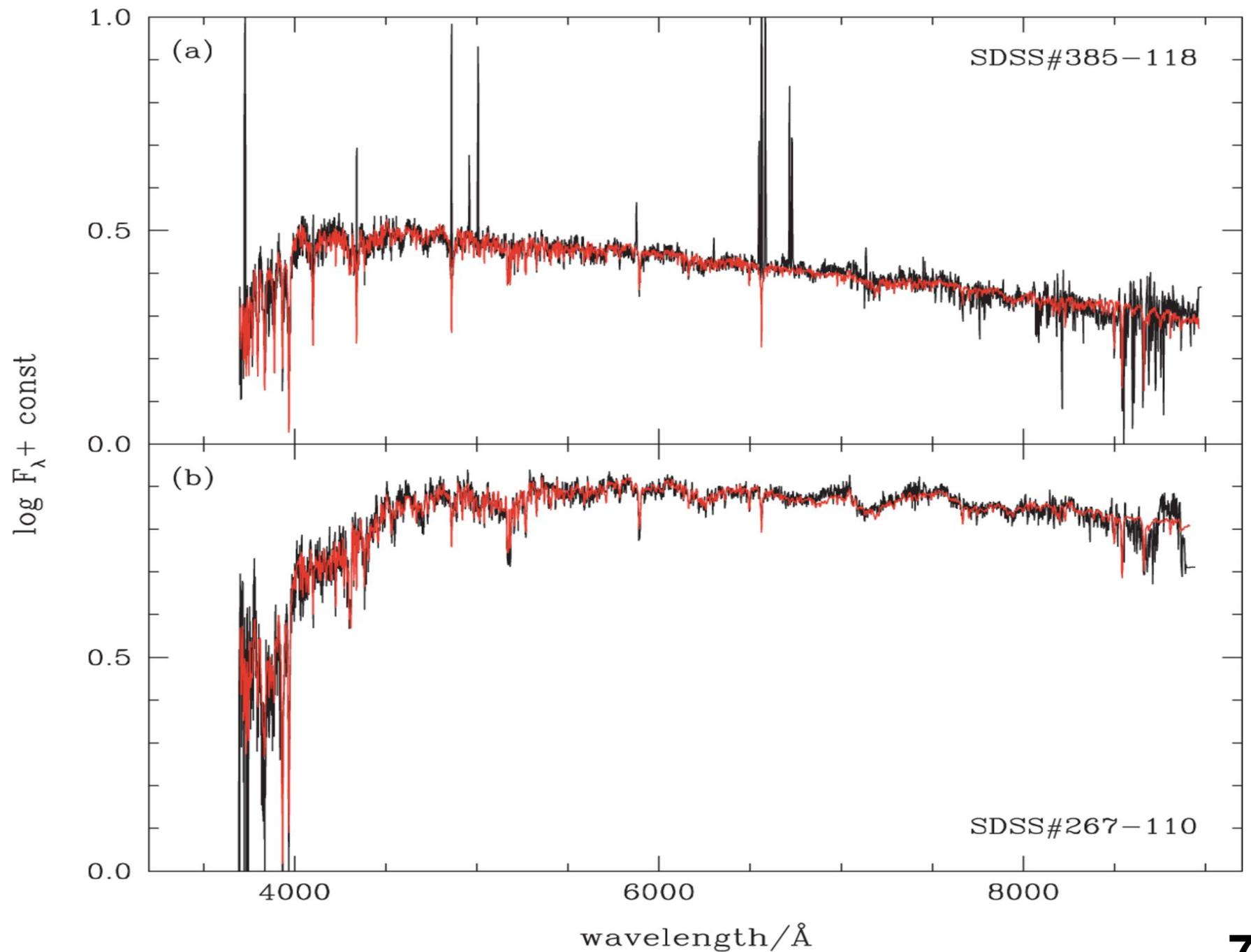
TABLE 2

THE PRESENT INTEGRATED COLORS OF GALAXIES 10^{10} YEARS OLD

β	$\alpha = 2.1$		$\alpha = 2.45$		R_B	$\alpha = 3.2$	
	$B - V$	$U - B$	$B - V$	$U - B$		$B - V$	$U - B$
0.....	0.23	-0.41	0.36	-0.24	1.0000	0.51	+0.06
1.....	0.31	-0.34	0.44	-0.17	0.8300	0.58	+0.12
2.....	0.41	-0.25	0.53	-0.08	0.6400	0.65	+0.18
3.....	0.53	-0.13	0.63	+0.03	0.4400	0.72	+0.24
4.....	0.65	+0.01	0.72	+0.14	0.2700	0.77	+0.28
5.....	0.74	+0.17	0.78	+0.23	0.1400	0.80	+0.31
6.....	0.80	+0.25	0.82	+0.28	0.0680	0.83	+0.33
7.....	0.83	+0.29	0.85	+0.32	0.0320	0.84	+0.33
8.....	0.85	+0.32	0.86	+0.33	0.0150	0.84	+0.34
9.....	0.86	+0.34	0.87	+0.34	0.0064	0.85	+0.34
10.....	0.87	+0.36	0.88	+0.35	0.0025	0.85	+0.35



Atualmente, mesmo considerando as deficiências teóricas decorrentes das simplificações, o cálculo dos modelos de síntese evolutiva está muito mais avançado sendo possível compará-los diretamente as observações espectroscópicas das galáxias como podemos verificar em Bruzual e Charlot (2003). Vários desses códigos estão disponíveis e podem ser utilizados como uma ferramenta auxiliar para facilitar a interpretação dos dados observacionais.



Evolução Química

Uma consequência natural da evolução fotométrica discutida na seção anterior é que quanto maior a atividade de formação estelar tanto mais importante será a população de estrelas massivas que evoluem rapidamente ejetando metais no meio interestelar através das supernovas. Portanto maior será a abundância química nesses objetos. O tratamento exato deste problema deve levar em consideração a proporção das estrelas mais massivas, nascidas no passado, e que em um dado momento estão terminando a sua evolução, e portanto retornando uma determinada quantidade de metais ao meio interestelar. No entanto, uma aproximação muito útil deste problema foi concebida por Schmidt (1963) e se tornou conhecida como a hipótese de reciclagem instantânea. As estrelas mais massivas e maiores responsáveis pelo enriquecimento do meio interestelar evoluem tão mais rapidamente que a idade média das galáxias que podemos considerar o retorno de metais como sendo instantâneo.

Massa(M/M_{\odot})	$\text{Log}(L/L_{\odot})$	$T_{\text{eff}} (10^3 \text{ K})$	Sp	$t(10^6 \text{ anos})$
120	6.2	53		3.9
60	5.7	48		4.0
40	5.4	44	O5	5.0
20	4.6	35	O8	9.0
12	4.0	28	B0.5	18.0
5	2.8	17	B4	10^2
1	-0.16	5.64	G5	10^4

Vamos supor que $Z=M_z/M_g$ represente a fração de metais presentes no meio interestelar em um certo momento. Na aproximação de reciclagem instantânea uma parte dos metais estão sendo consumidos pelo processo de formação de novas estrelas ($Z dM_*/dt$). Ao mesmo tempo as estrelas massivas retornam ao meio interestelar uma proporção de metais ($p dM_*/dt$) sendo p uma quantidade conhecida como fator de doação de metais (yield). Portanto deve ser aproximadamente válida a relação

$$d(M_z)/dt=d(Z M_g)/dt \approx -Z dM_*/dt + p dM_*/dt$$

Ademais vamos imaginar ainda que a massa total da galáxia seja conservada de tal forma que em qualquer instante $M_g + M_* = M = \text{Cte}$. Esta condição nos permite estabelecer que

$$dM_*/dt = -dM_g/dt$$

Nestas condições podemos simplificar a equação de enriquecimento químico de tal forma que $d(Z M_g)/dt = Z dM_g/dt + M_g dZ/dt$ ou ainda,

$$M_g dZ/dt = -p dM_g/dt$$

que pode ser facilmente integrada na forma

$$Z(t) - Z(0) = -p [\ln M_g(t) - \ln M_g(0)]$$

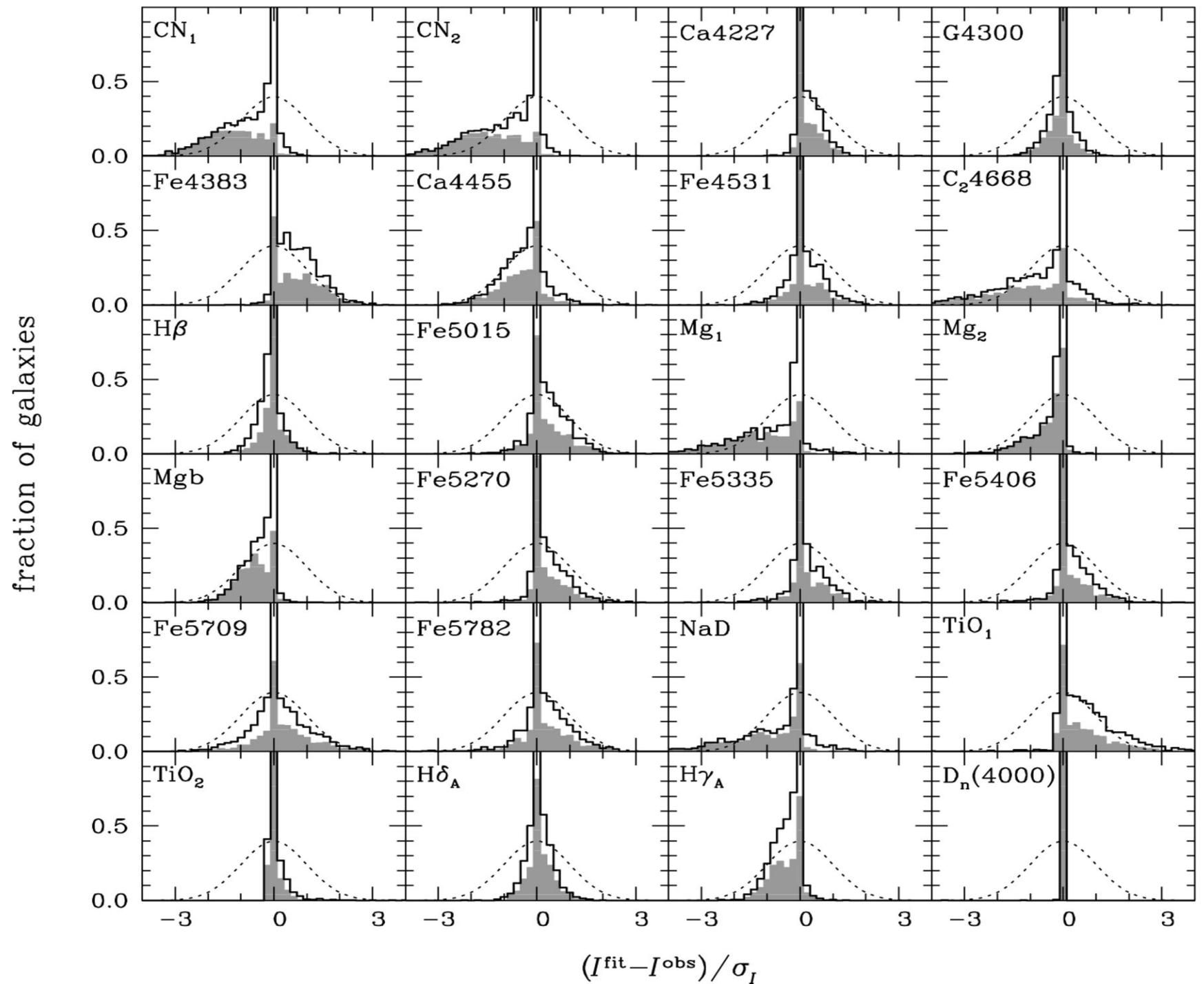
Quando as galáxias se formaram acredita-se que o gás não deveria ter metais e portanto $Z(0)=0$. Por outro lado a massa de gás no início do colapso deve ser igual à massa total que observamos hoje ($M_g(0)=M$). Portanto, considerando que a fração de gás é definida por $f = M_g/M$, temos como resultado final que

$$Z(t) = -p \ln f$$

No caso da vizinhança solar sabemos que a densidade projetada de massa em estrelas no plano do disco é da ordem de $44,6 M_{\odot}/pc^2$ enquanto que a densidade de gás é cerca de $5,3 M_{\odot}/pc^2$. Portanto a fração de gás no disco local é $f \cong 0,12$. Por outro lado a abundância química média do meio interestelar é aproximadamente igual à abundância solar $Z_{\odot} \cong 0,02$. Aplicando-se o resultado acima concluímos que, apesar das conhecidas limitações deste modelo, o fator doação de metais na vizinhança solar deve ser da ordem de $p \cong 0,0094$.

Portanto, supondo que o fator de doação de metais não seja muito distinto em outras regiões, devemos esperar que em uma galáxia onde a fração média de gás seja muito elevada, $f \cong 0,5$, deve ter um meio interestelar relativamente pobre em metais com $Z \cong 0,69p \cong 0,0065 \cong 0,32 Z_{\odot}$. Ao contrário uma galáxia que sofreu uma intensa formação estelar no passado e que hoje tem uma fração de gás muito reduzida, $f \cong 0,02$, deveria ter uma abundância química maior em seu meio interestelar $Z \cong 3,91p \cong 0,037 \cong 1,8Z_{\odot}$.

Utilizando os modelos mais modernos (Bruzual, Charlot, 2003) podemos fazer uma comparação simultânea de várias linhas espectrais e estimar a abundância química em grandes amostras de galáxias. No exemplo ao lado foram 2010 galáxias da base de dados SDSS.



FIM