ГЛ. АС. Д-Р ОРЛИН СТАНЧЕВ, КАТЕДРА “АСТРОНОМИЯ”, СУ “СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ”

Колко празно е междузвездното пространство

Къде и как се раждат звездите?

КОСМИЧЕСКИ УИКЕНД, 02 - 03.11.2024Г. ПРИРОДОНАУЧЕН МУЗЕЙ ЧЕРНИ ОСЪМ

План на презентацията

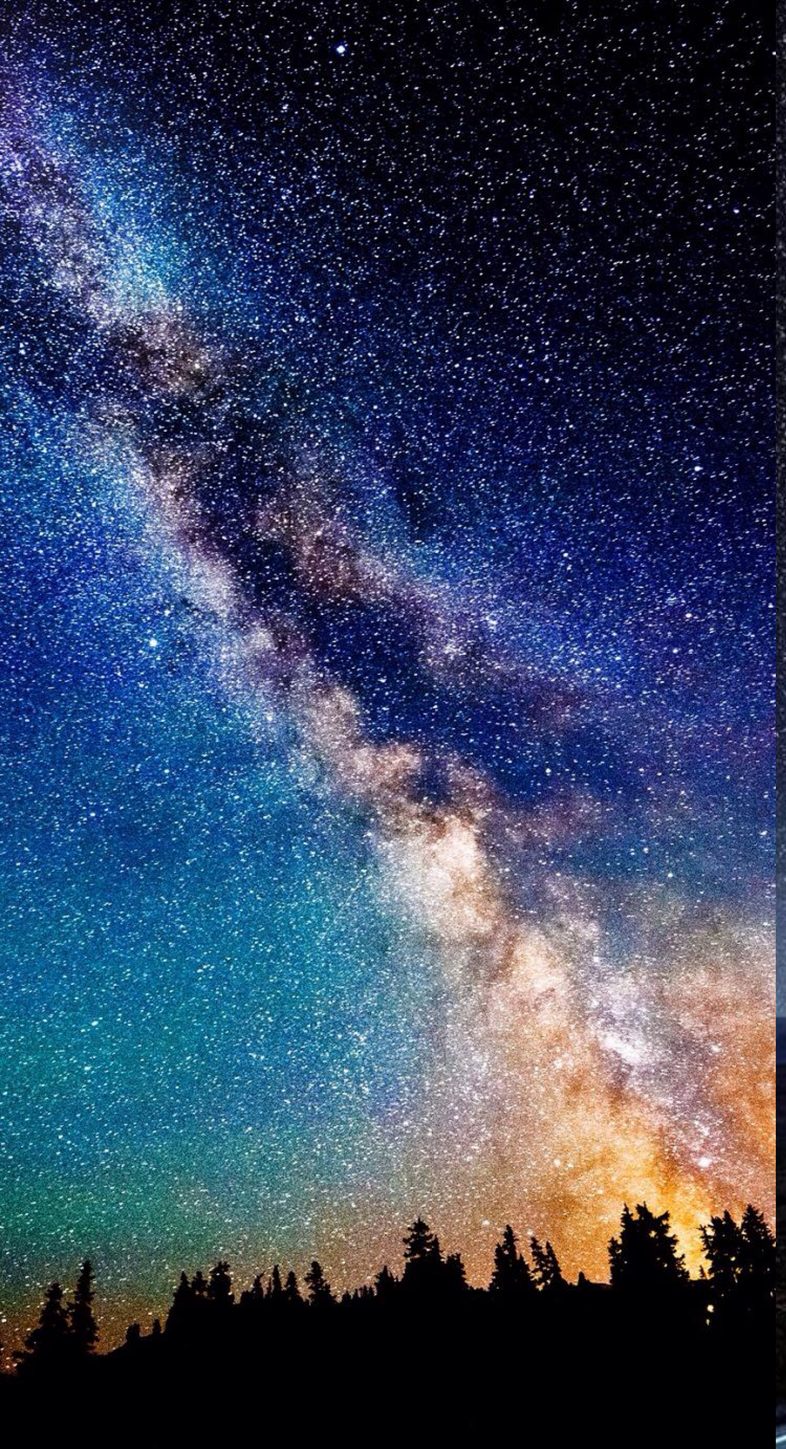
- Какво наричаме междузвездна среда?
- Кратка история на изследванията на междузвездната среда.
- Кои фактори определят физиката на междузвездната среда?
- Състав, свойства и компоненти.
- Роля на гравитацията и турбулентността за физиката на молекулярните облаци.

Какво наричаме междузвездна среда?



“The Interstellar Medium is anything not in stars.”

D. Osterbrock





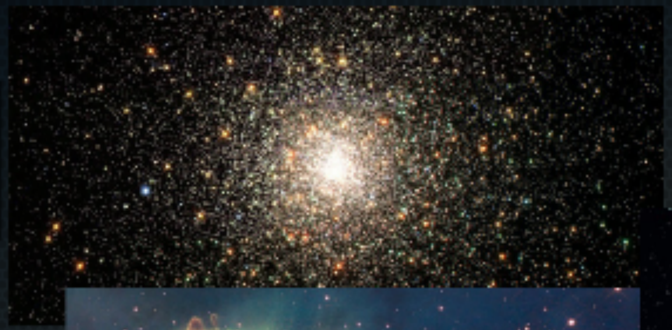

SCIENCEphotoLIBRARY

От какво „са направени“ галактиките?

Тъмно вещество (тъмна материя) ~ 90 %



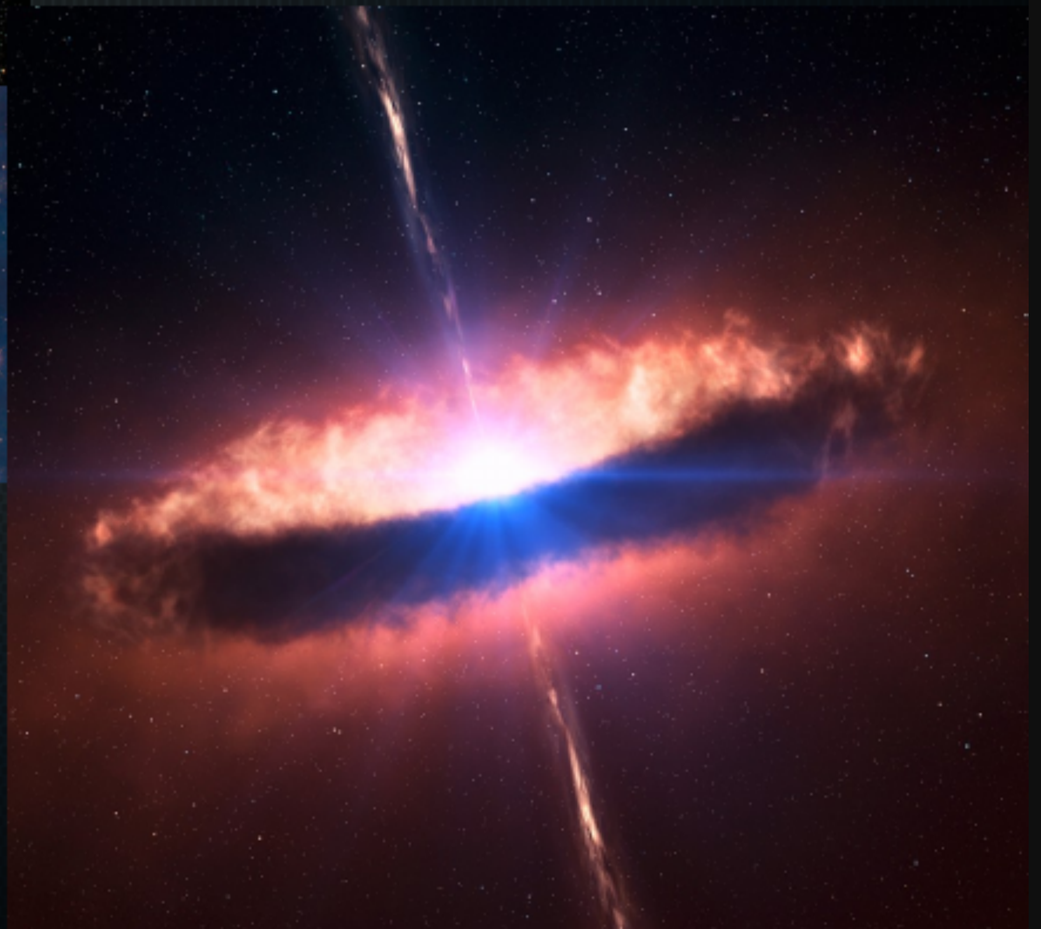
Звезди, ~ 10 %



Газ и прах, ~ 1 %



Черни дупки, ~ 0.1 %

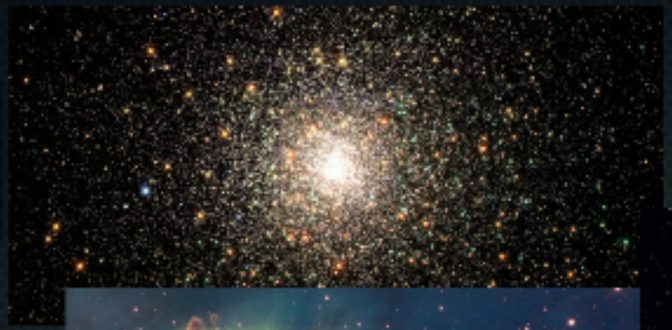


От какво „са направени“ галактиките?

Тъмно вещество (тъмна материя) ~ 90 %



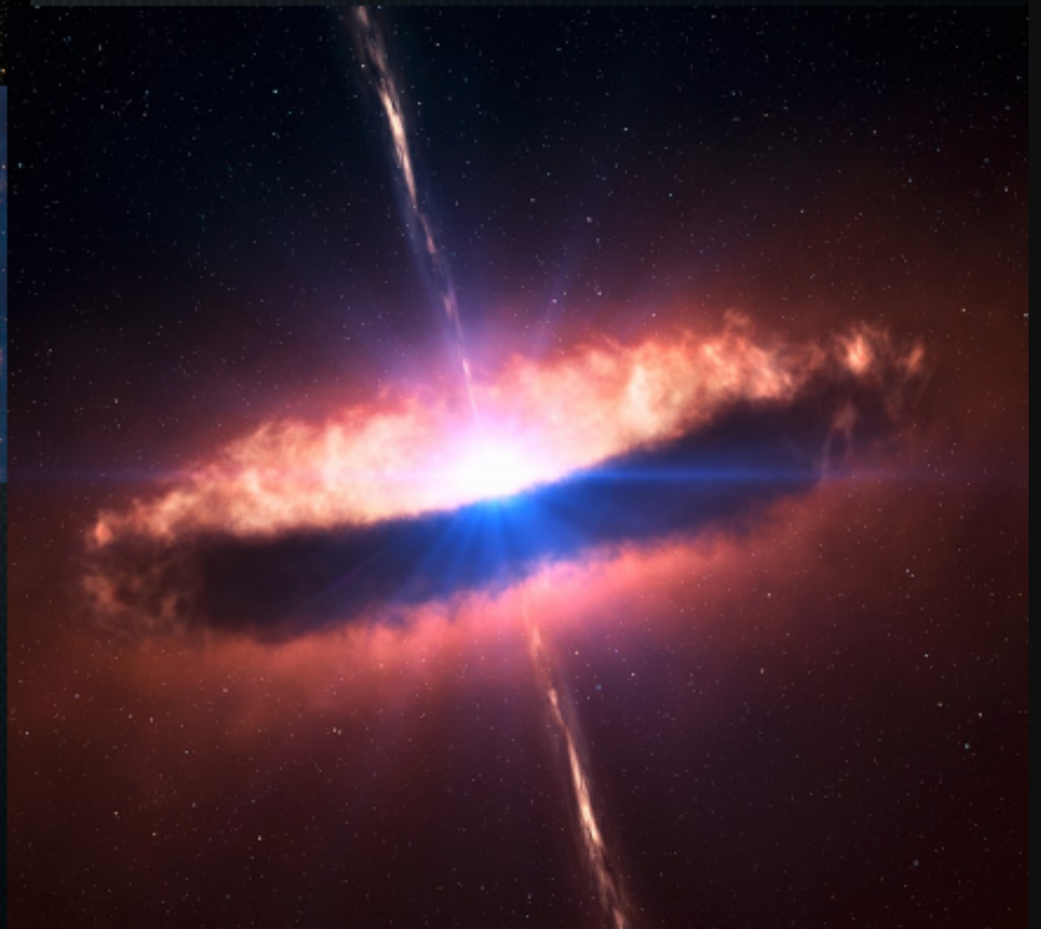
Звезди, ~ 10 %



Газ и прах, ~ 1 %

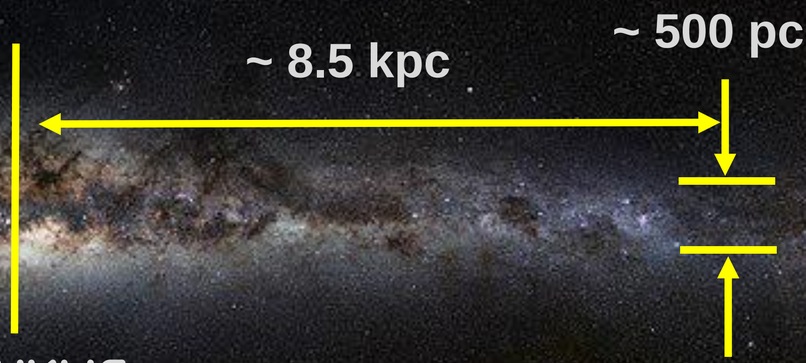


Черни дупки, ~ 0.1 %



Средно разстояние между звездите в Галактиката: ~ 2 pc

Звездите заемат приблизително 3 x 10^{-10} от обема на Галактиката.



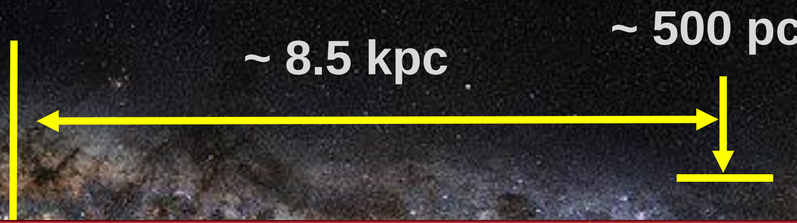
МС е концентрирана **предимно в тънкия диск** на Галактиката.

В масово отношение (< 15 kpc): 10^{11} $M_\odot$

- звезди + тъмна материя : ~ 2x10^{10} $M_\odot$
- **междузвездна среда:** ~ 10^{9} $M_\odot$

Средно разстояние между звездите в Галактиката: ~ 2 pc

Звездите заемат приблизително 3 x 10^{-10} от обема на Галактиката.



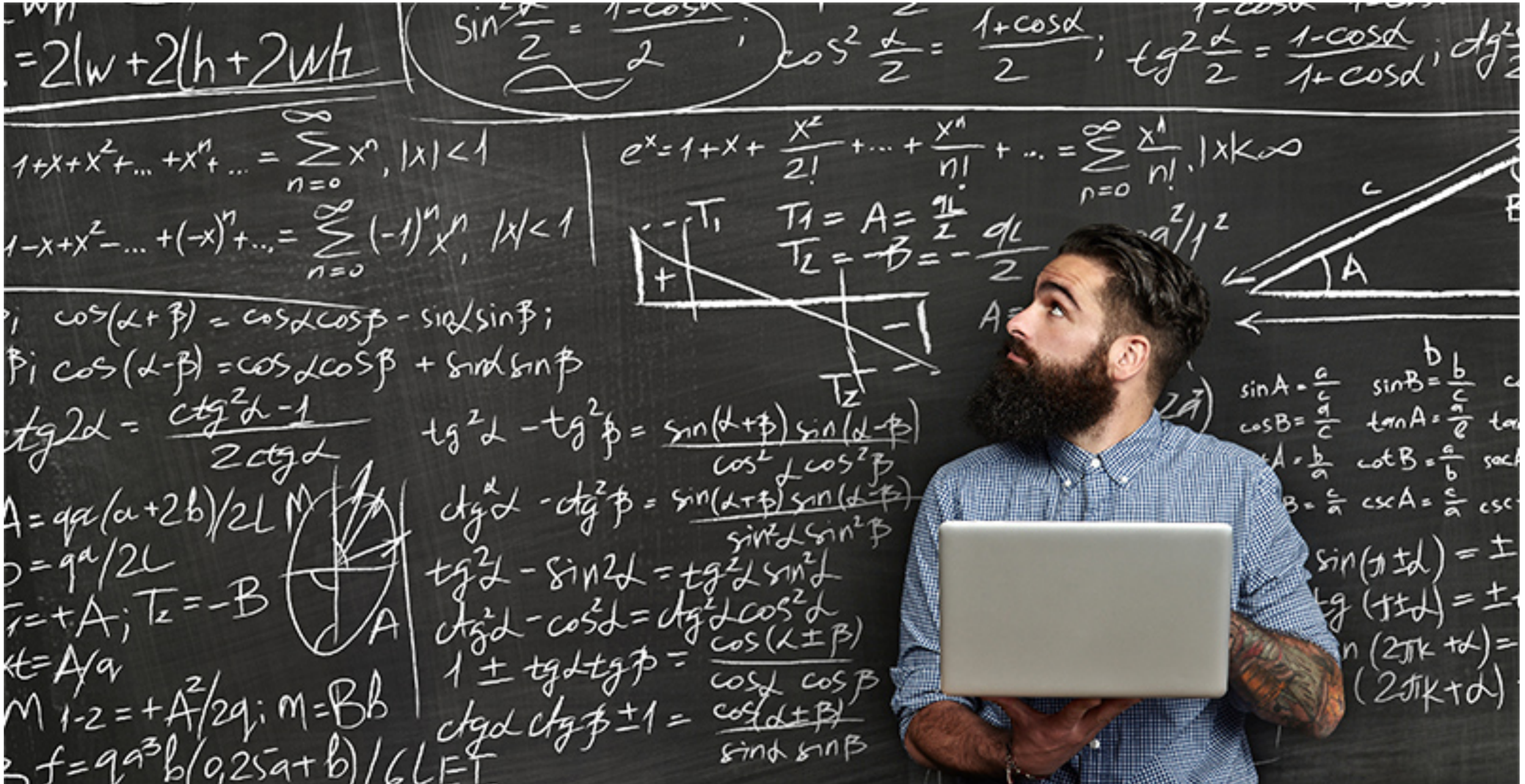
Земната атмосфера	**~ 3 x 10^{19} частици cm^{-3}**
Лабораторен вакуум	**~ 3 x 10^{12} частици cm^{-3}**
Молекулярни облаци	**~ 10^{6} частици cm^{-3}**
Средна плътност в междузвездната среда	**~ 1 частица cm^{-3} !!**

МС е концентрирана **предимно в** диск на Галактиката.

В масово отношение (< 15 kpc): 10^{1}

- звезди + тъмна материя : ~
- **междузвездна среда:** ~ 10^{9} M

Как сме разбрали, това което знаем ?



Преди 1900 г.

Кратък исторически преглед



Уилям Хершел

1736 - 1822



Дифузни мъглявини

Отражателни мъглявини



Планетарни мъглявини

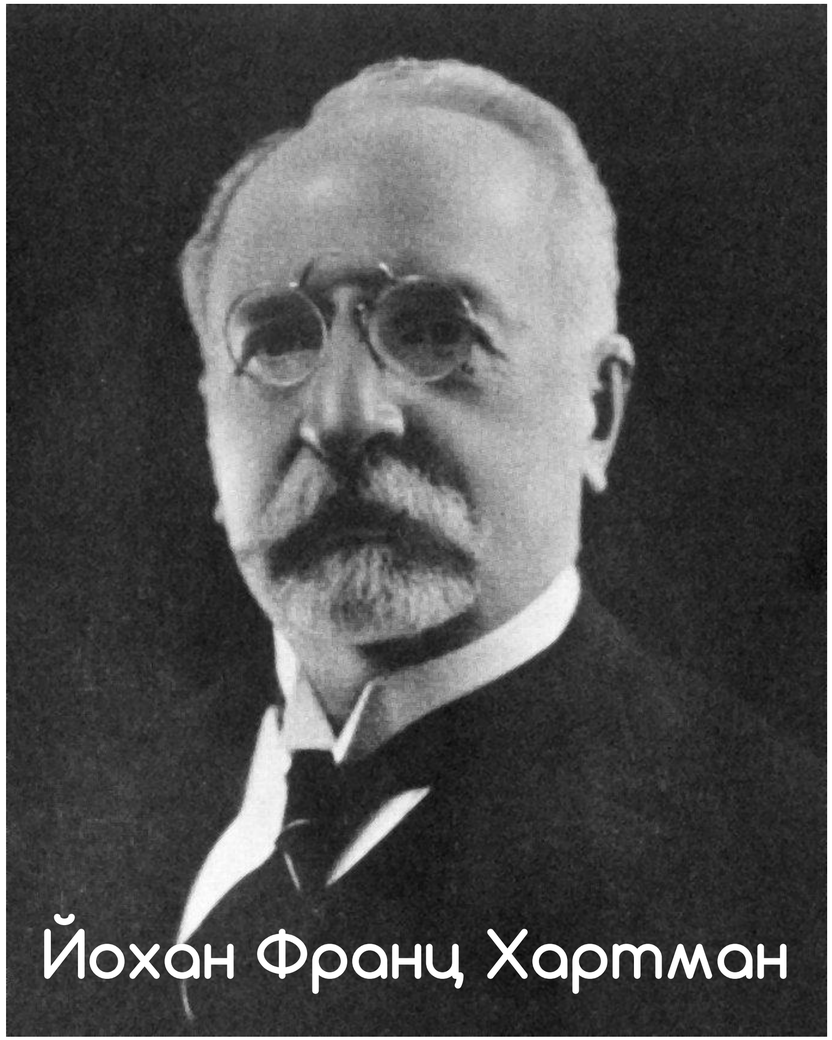
Хершел: сферични мъглявини



Влакнести структури

1904 г.

Кратък исторически преглед



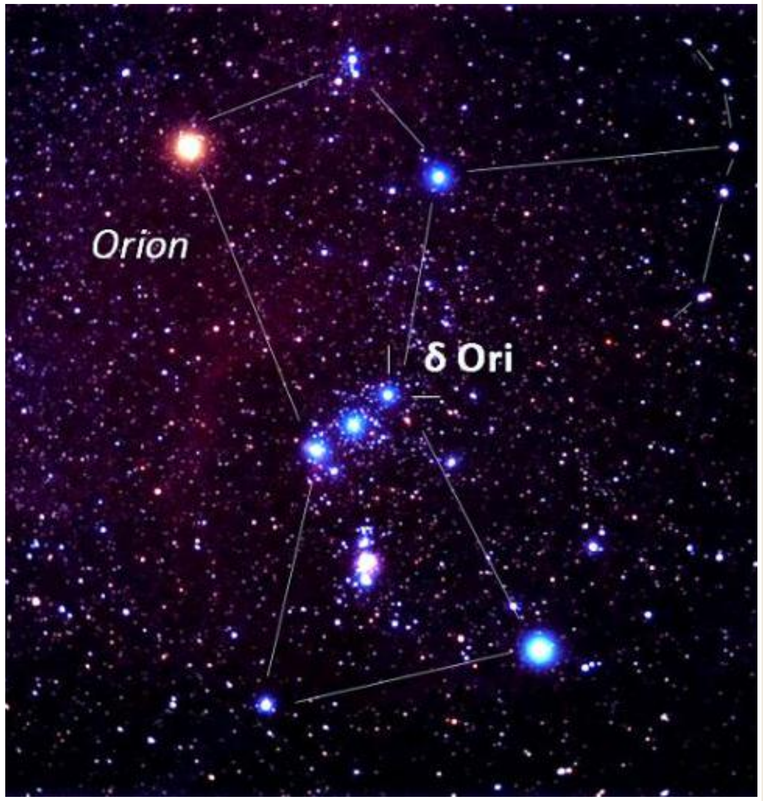
Йохан Франц Хартман

1865 - 1936 г.

Първото наблюдателно доказателство за съществуването

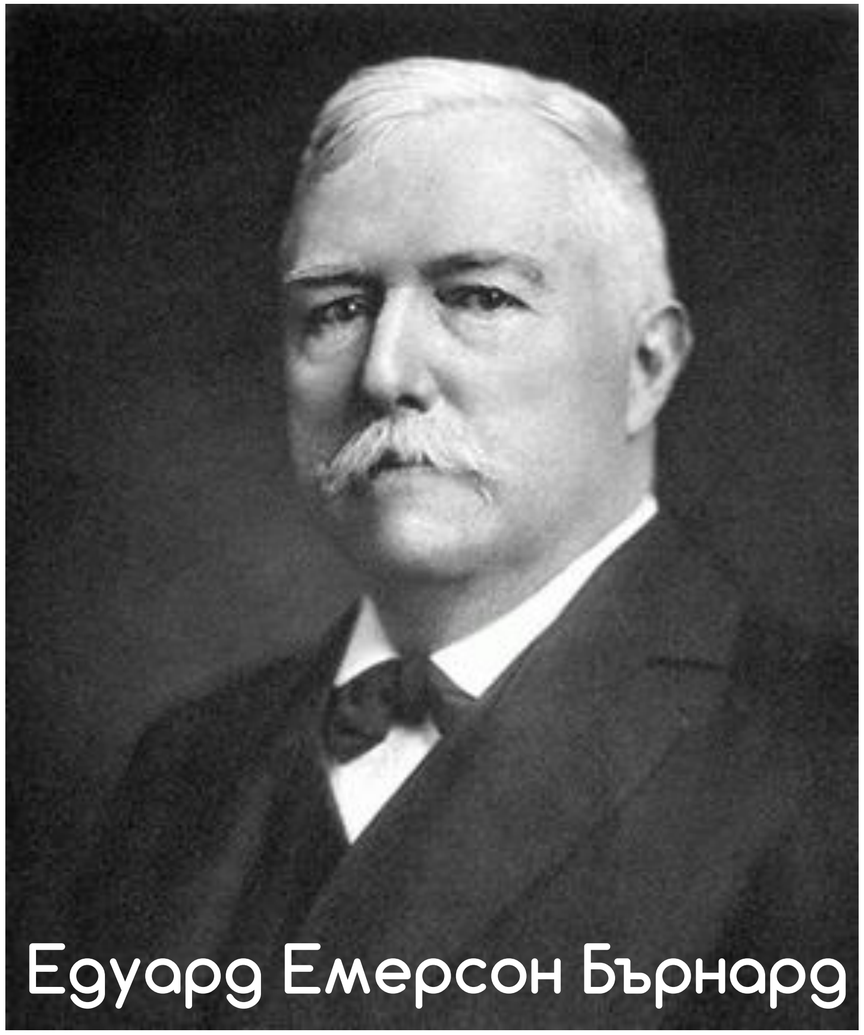
на МС!

Спектрално изследване на двойната звездна система δ Ori



1919 г.

Кратък исторически преглед



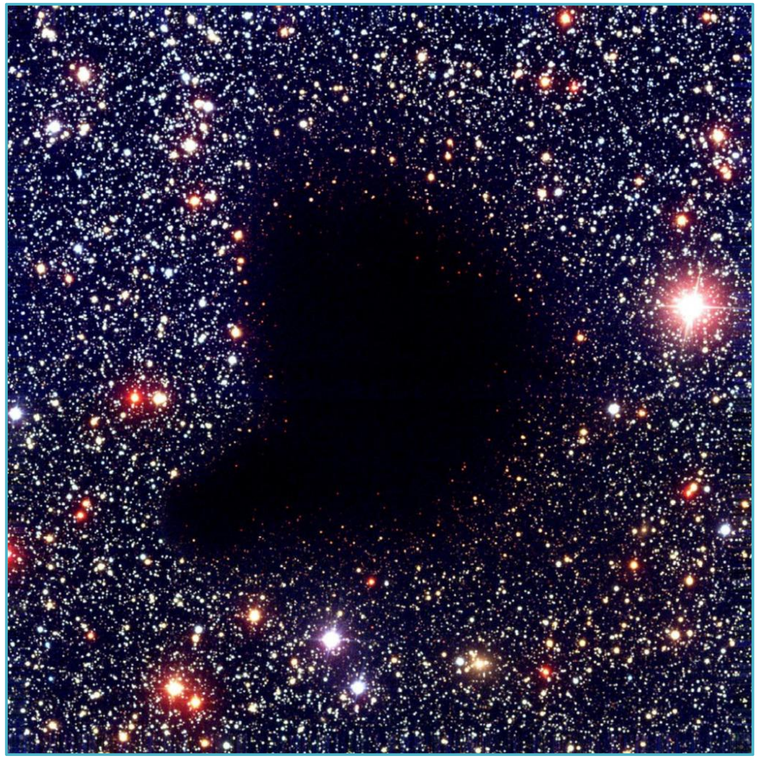
Едуард Емерсон Бърнард

1857 - 1923 г.

Първият каталог на "тъмни мъглявини".

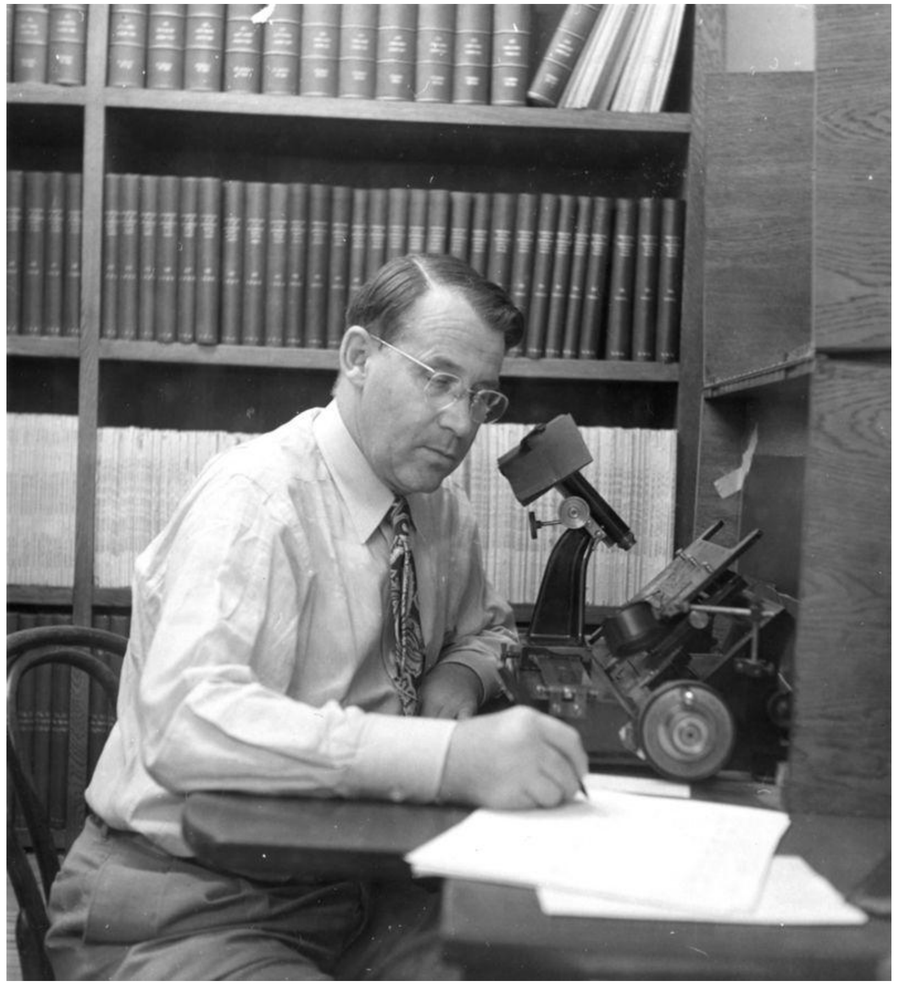
Публикуван през 1927 г., когато включвал около 350 обекта.

Празнини в разпределението на звездите в Галактиката.



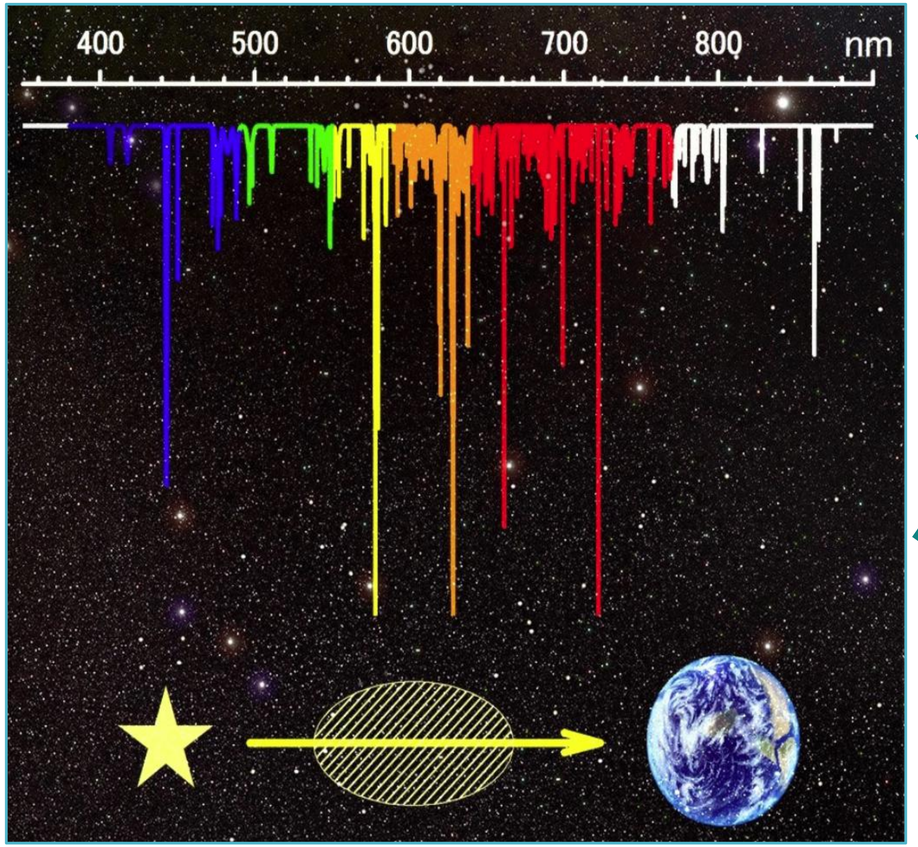
1934 г.

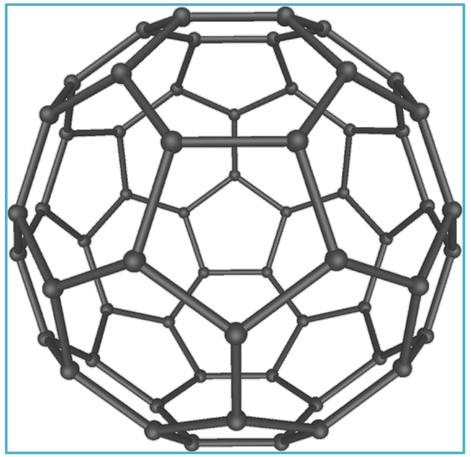
Кратък исторически преглед



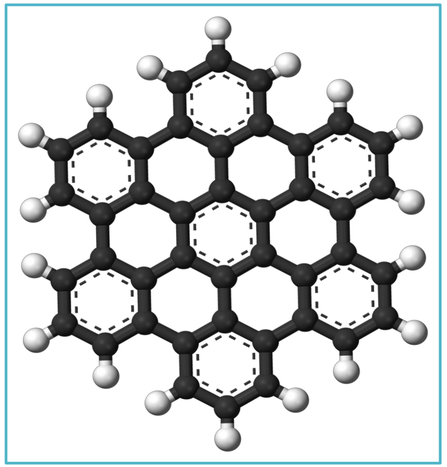
Пол Мерил (1887 – 1961)

Diffuse Interstellar Bands (DIBs)





Fullerenes (C_{60})

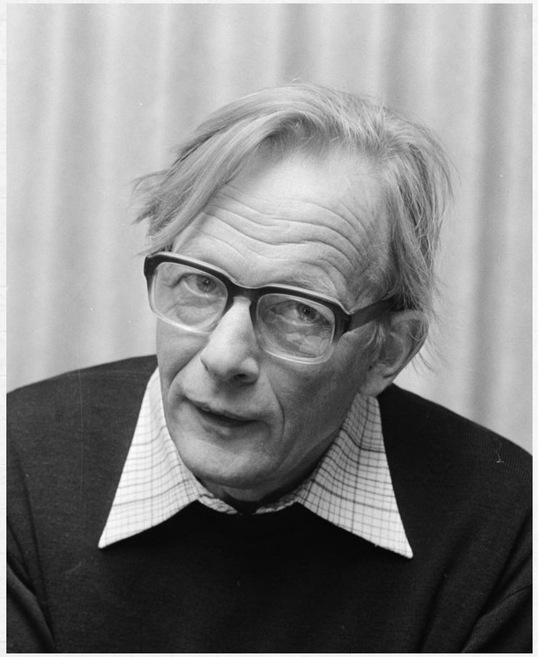


PAHs

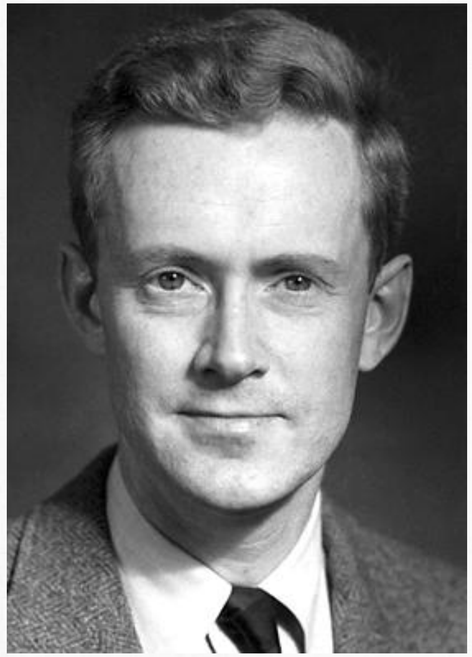
1944 – 1951 г.

Кратка история на междузвездната среда

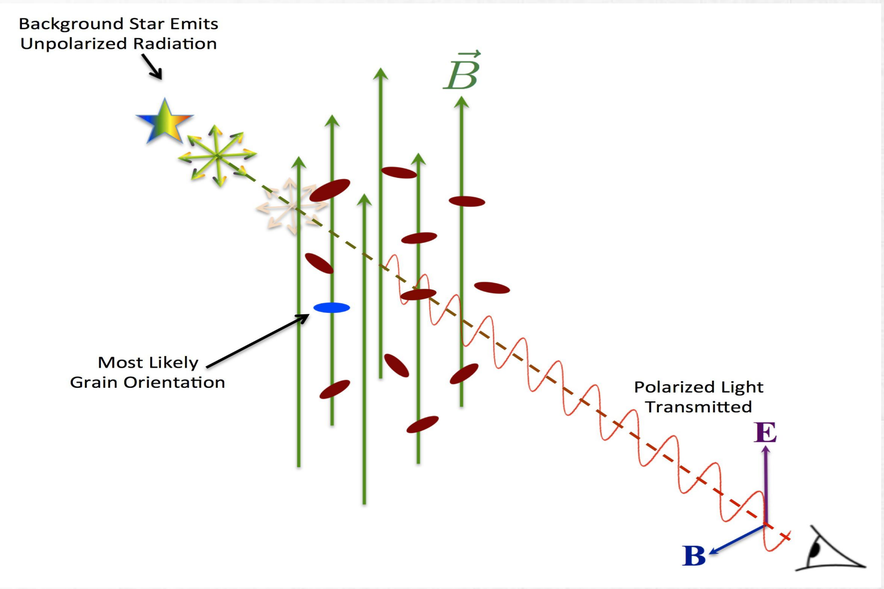
Hendrik C. van de Hulst (1918 – 2000)

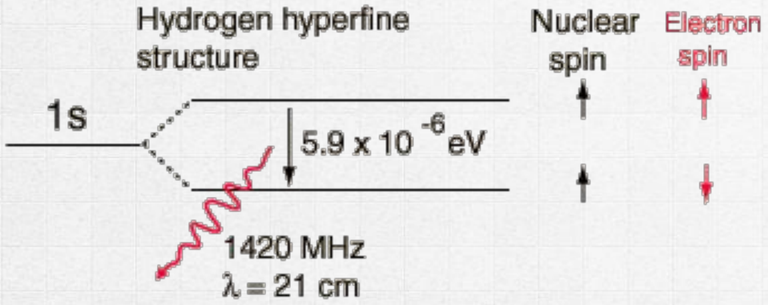


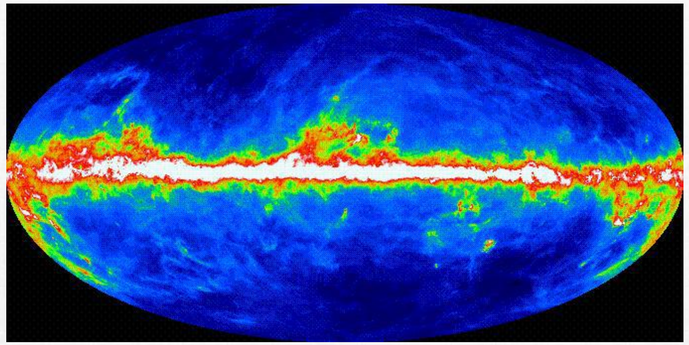
Edward Mills Purcell (1912 – 1997)

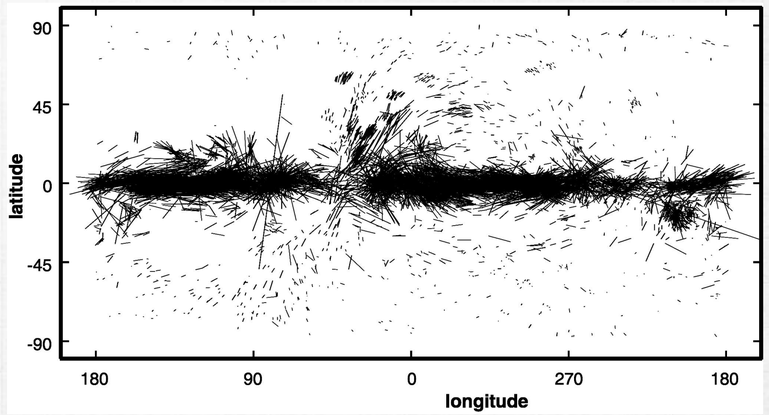


ефект на Hiltner – Hall, (1947)



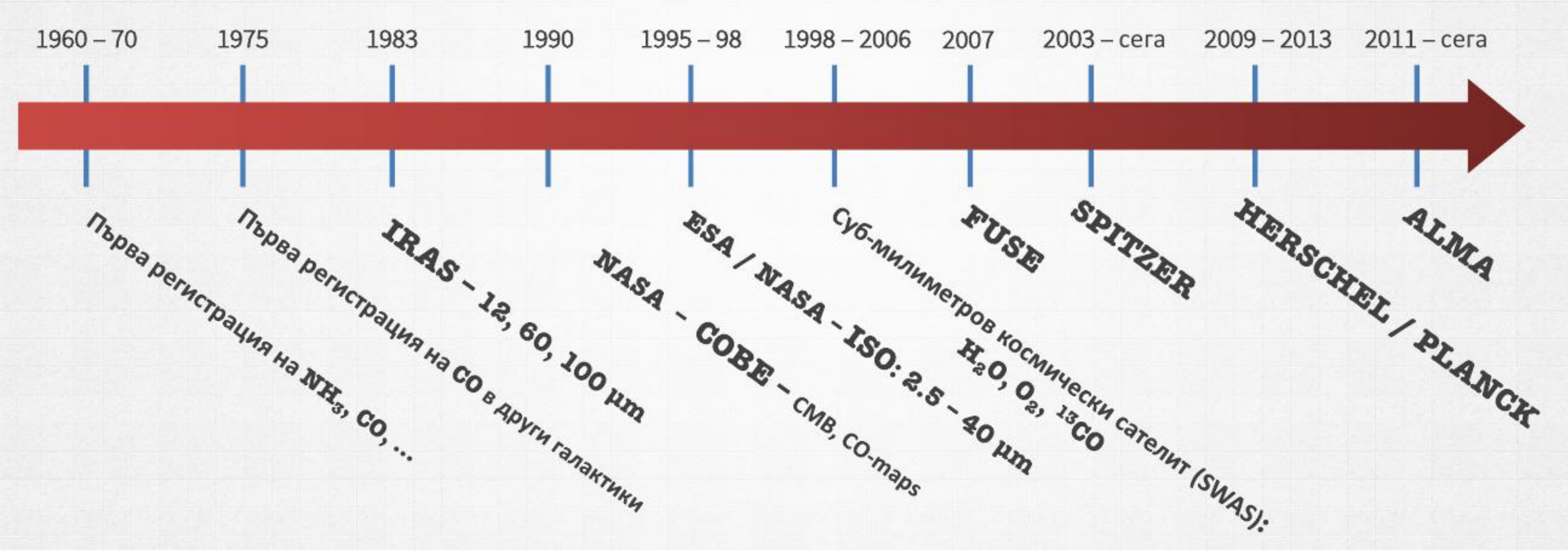




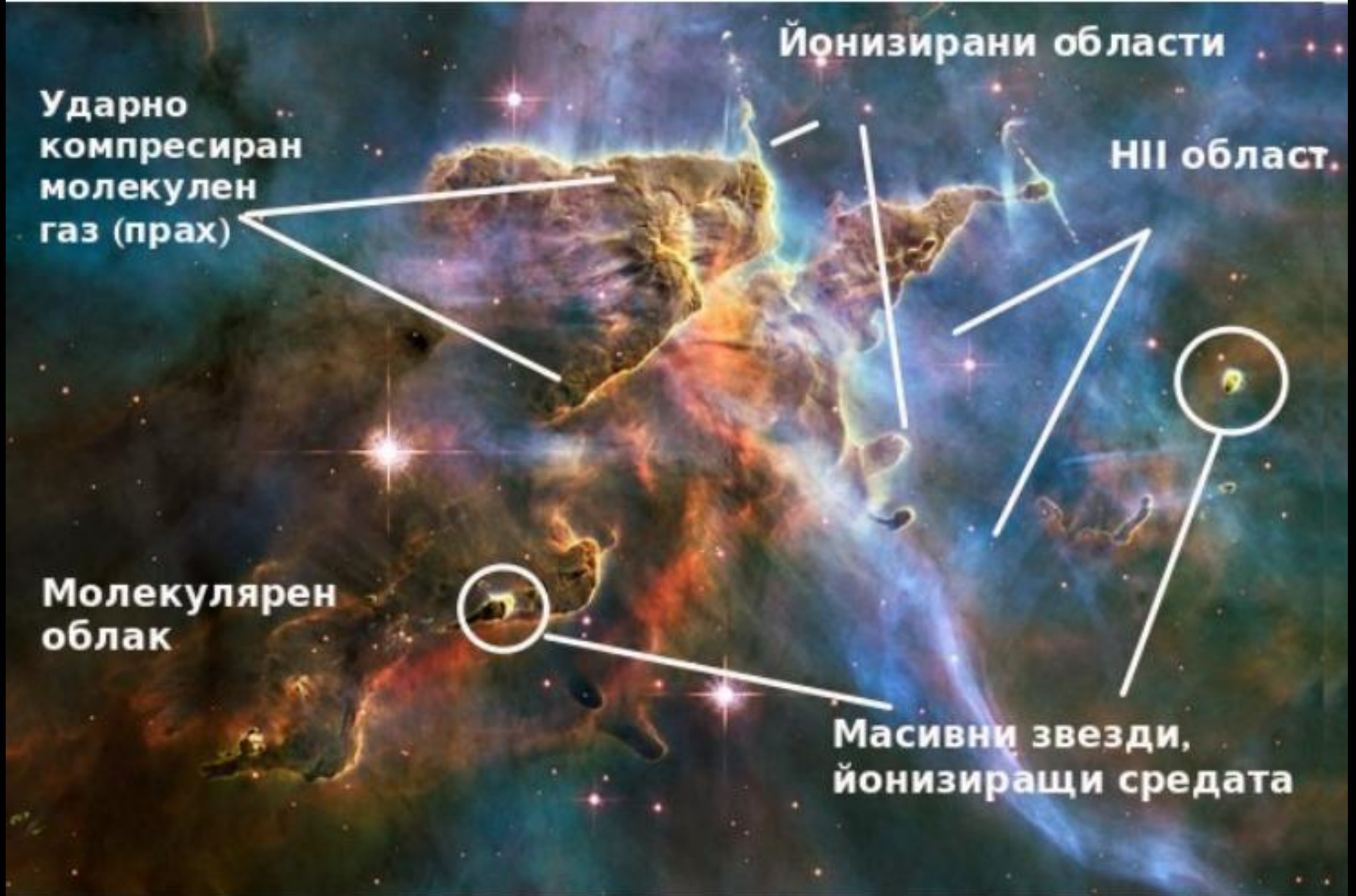


1960 - ... г.

Кратък исторически преглед

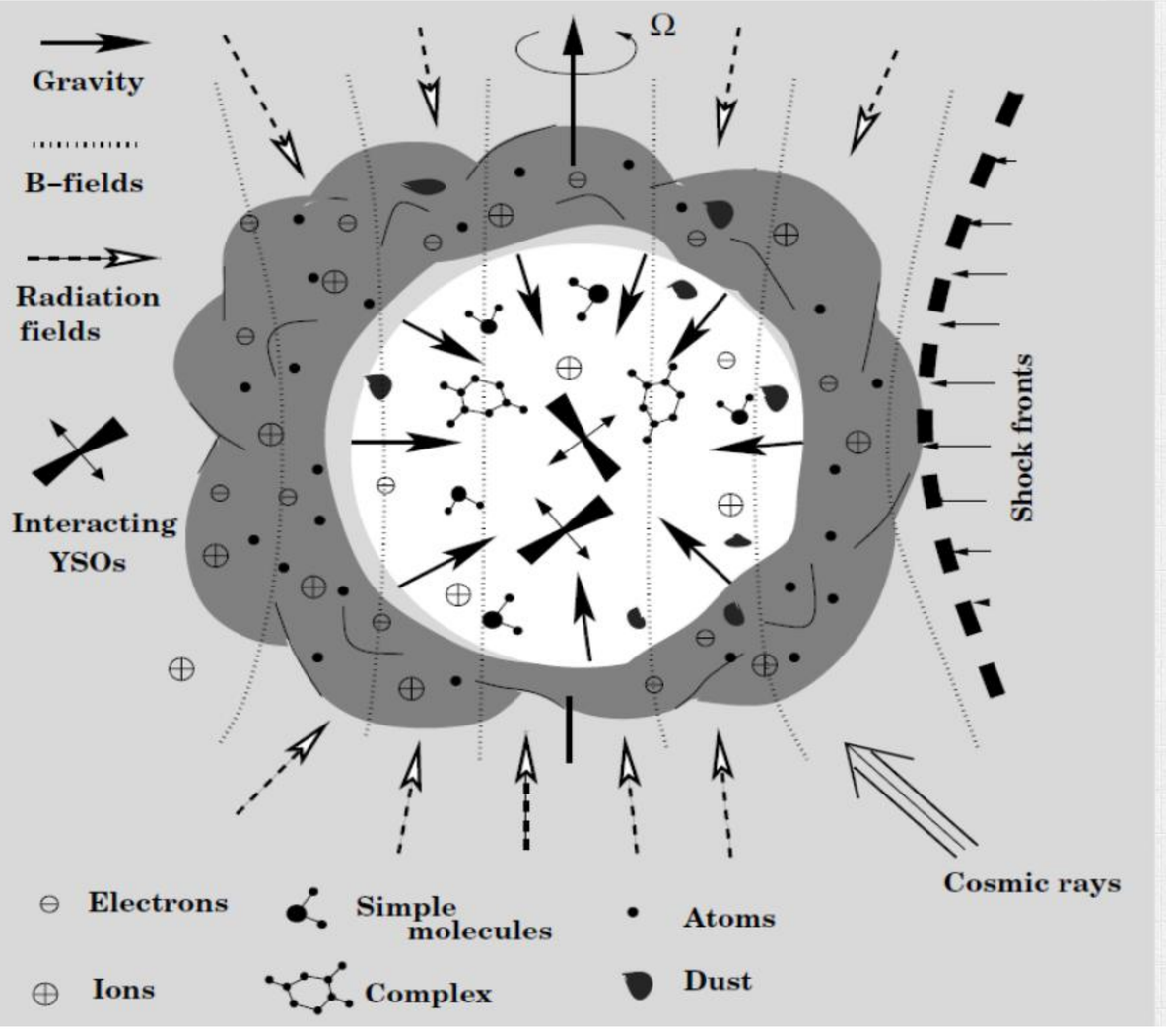


Състав и физика на междузвездната среда


Йонизирани области
Ударно компресиран молекулен газ (прах)
HII област
Молекулярен облак
Масивни звезди, йонизиращи средата

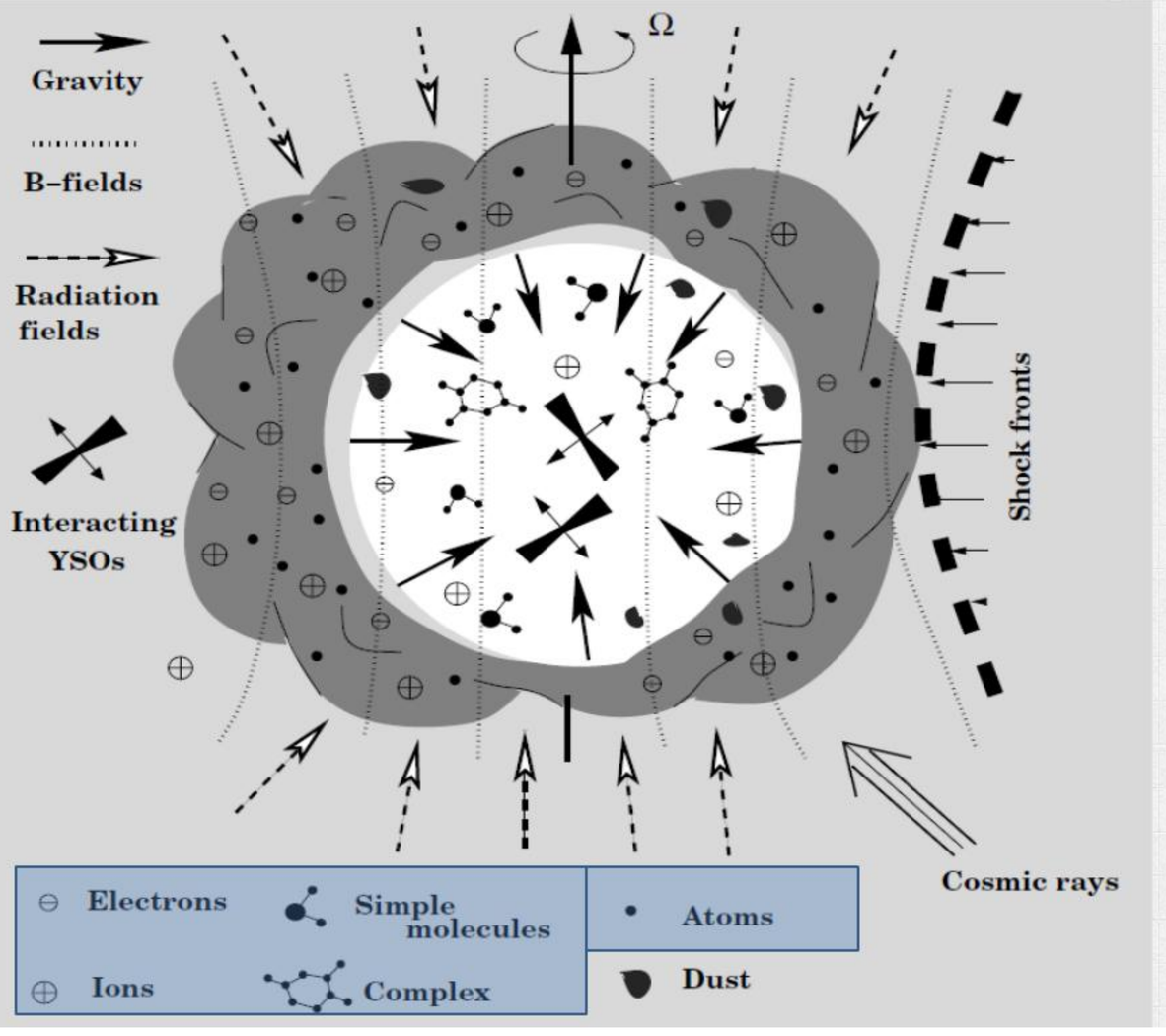
- **Междузвезден газ**: йони, атоми и молекули в газовата компонента.
- **Междузвезден прах**: малки твърди прашинки (< 1 μm) смесени с газовата фаза.
- **Космично лъчение**: йони и електрони с релативистки енергии, много по-големи от топлинната ($E > 10^2 - 10^{11}$ GeV).
- **Електромагнитно лъчение**:
  - КМФ
  - Излъчване от звездите
  - Спектрални линии на йони, атоми и молекули
  - Топлинно излъчване от междузвезден прах
  - Излъчване от свободно-свободни преходи в плазмена среда
  - Синхротронно излъчване от релативистични електрони
  - Гама лъчи.

- **Магнитно поле**: част от глобалното магнитно поле на Галактиката. Моделира МС чрез създаване на анизотропия в средата и оказва динамично действие срещу гравитацията.
- **Гравитационно поле**



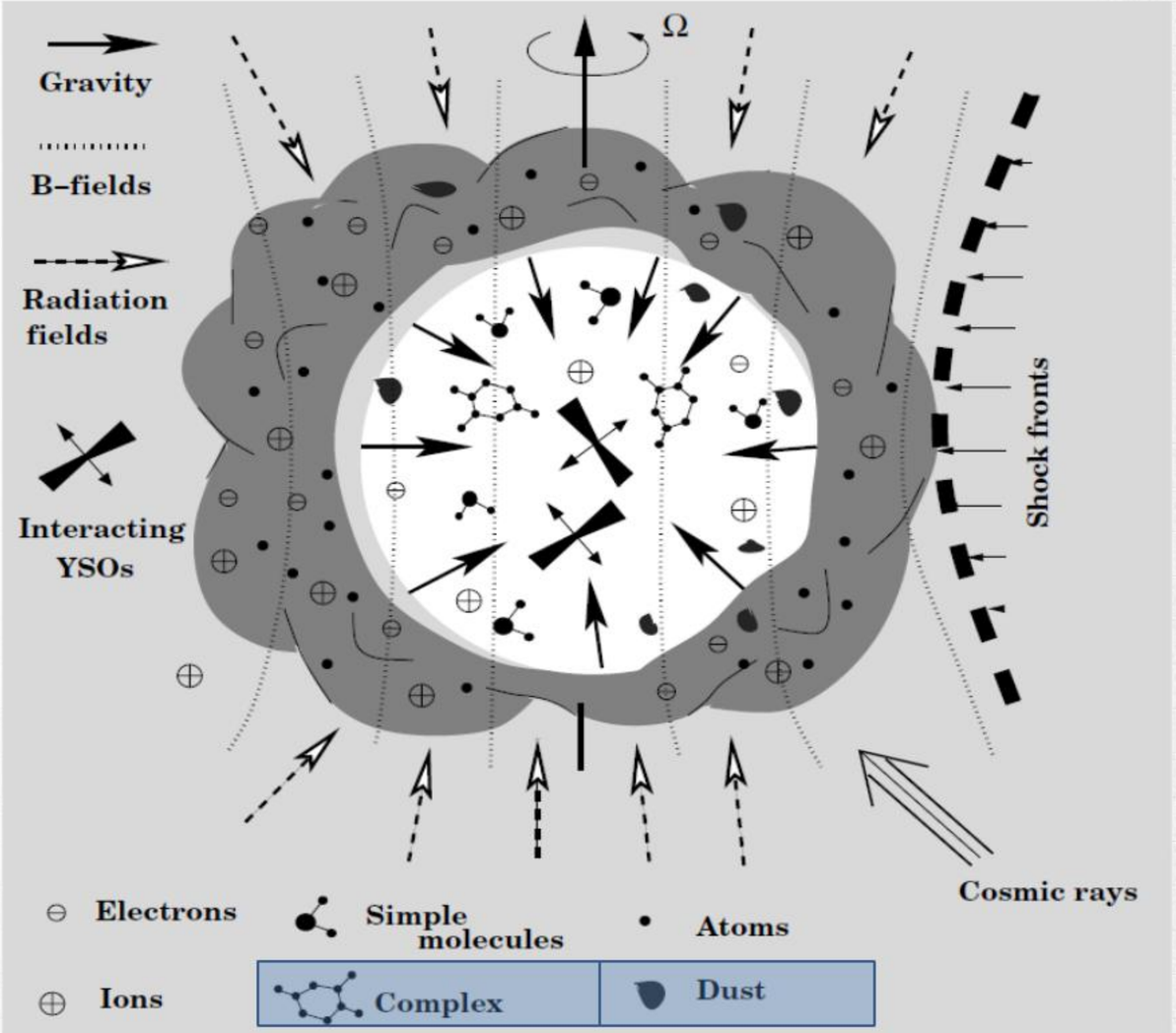
- **Междузвезден газ**: йони, атоми и молекули в газовата компонента.
- **Междузвезден прах**: малки твърди прашинки (< 1 μm) смесени с газовата фаза.
- **Космично лъчение**: йони и електрони с релативистки енергии, много по-големи от топлинната ($E > 10^2 - 10^{11}$ GeV).
- **Електромагнитно лъчение**:
  - КМФ
  - Излъчване от звездите
  - Спектрални линии на йони, атоми и молекули
  - Топлинно излъчване от междузвезден прах
  - Излъчване от свободно-свободни преходи в плазмена среда
  - Синхротронно излъчване от релативистични електрони
  - Гама лъчи.

- **Магнитно поле**: част от глобалното магнитно поле на Галактиката. Моделира МС чрез създаване на анизотропия в средата и оказва динамично действие срещу гравитацията.
- **Гравитационно поле**



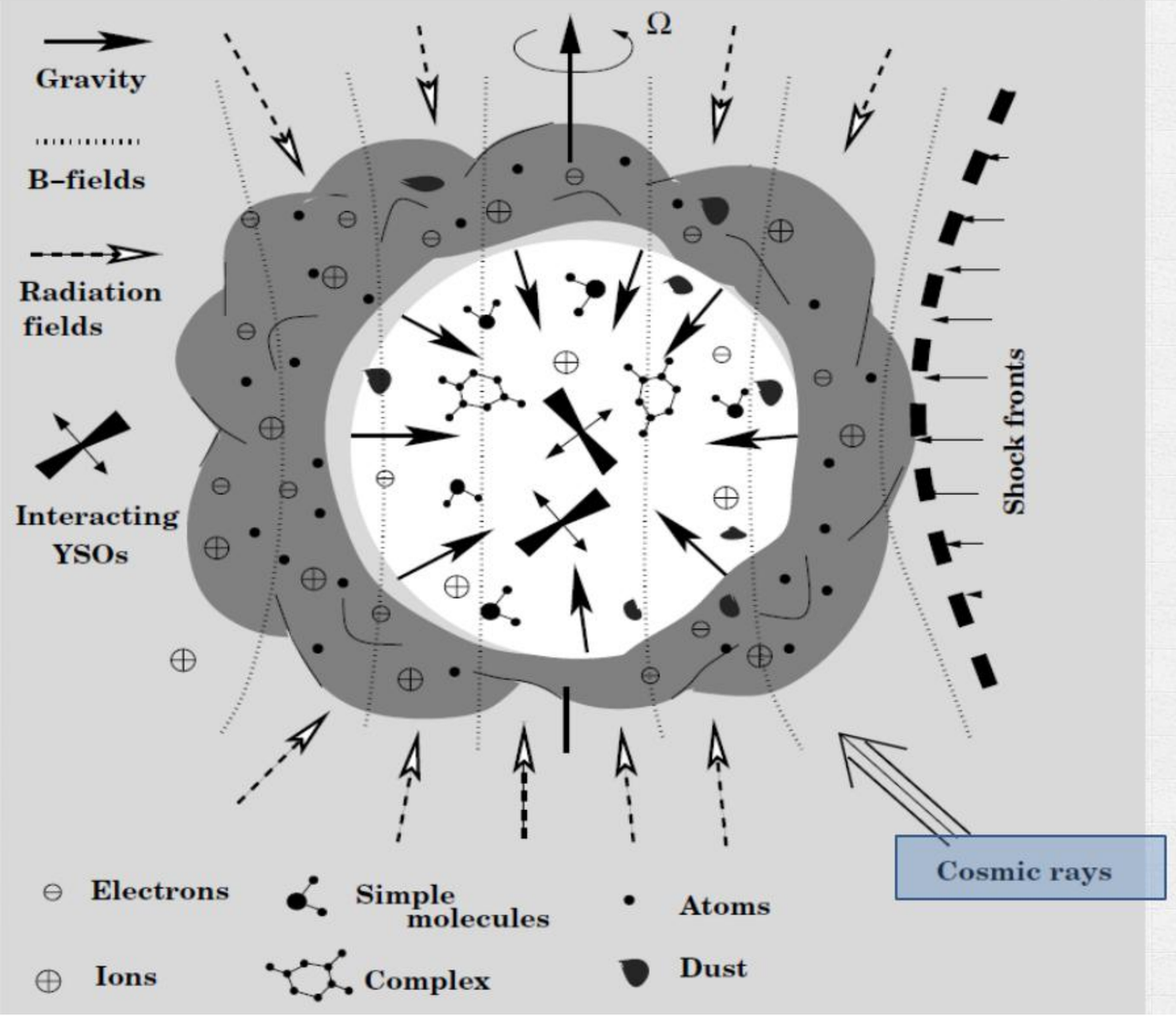
- **Междузвезден газ**: йони, атоми и молекули в газовата компонента.
- **Междузвезден прах**: малки твърди прашинки (< 1 μm) смесени с газовата фаза.
- **Космично лъчение**: йони и електрони с релативистки енергии, много по-големи от топлинната ($E > 10^2 - 10^{11}$ GeV).
- **Електромагнитно лъчение**:
  - КМФ
  - Излъчване от звездите
  - Спектрални линии на йони, атоми и молекули
  - Топлинно излъчване от междузвезден прах
  - Излъчване от свободно-свободни преходи в плазмена среда
  - Синхротронно излъчване от релативистични електрони
  - Гама лъчи.

- **Магнитно поле**: част от глобалното магнитно поле на Галактиката. Моделира МС чрез създаване на анизотропия в средата и оказва динамично действие срещу гравитацията.
- **Гравитационно поле**



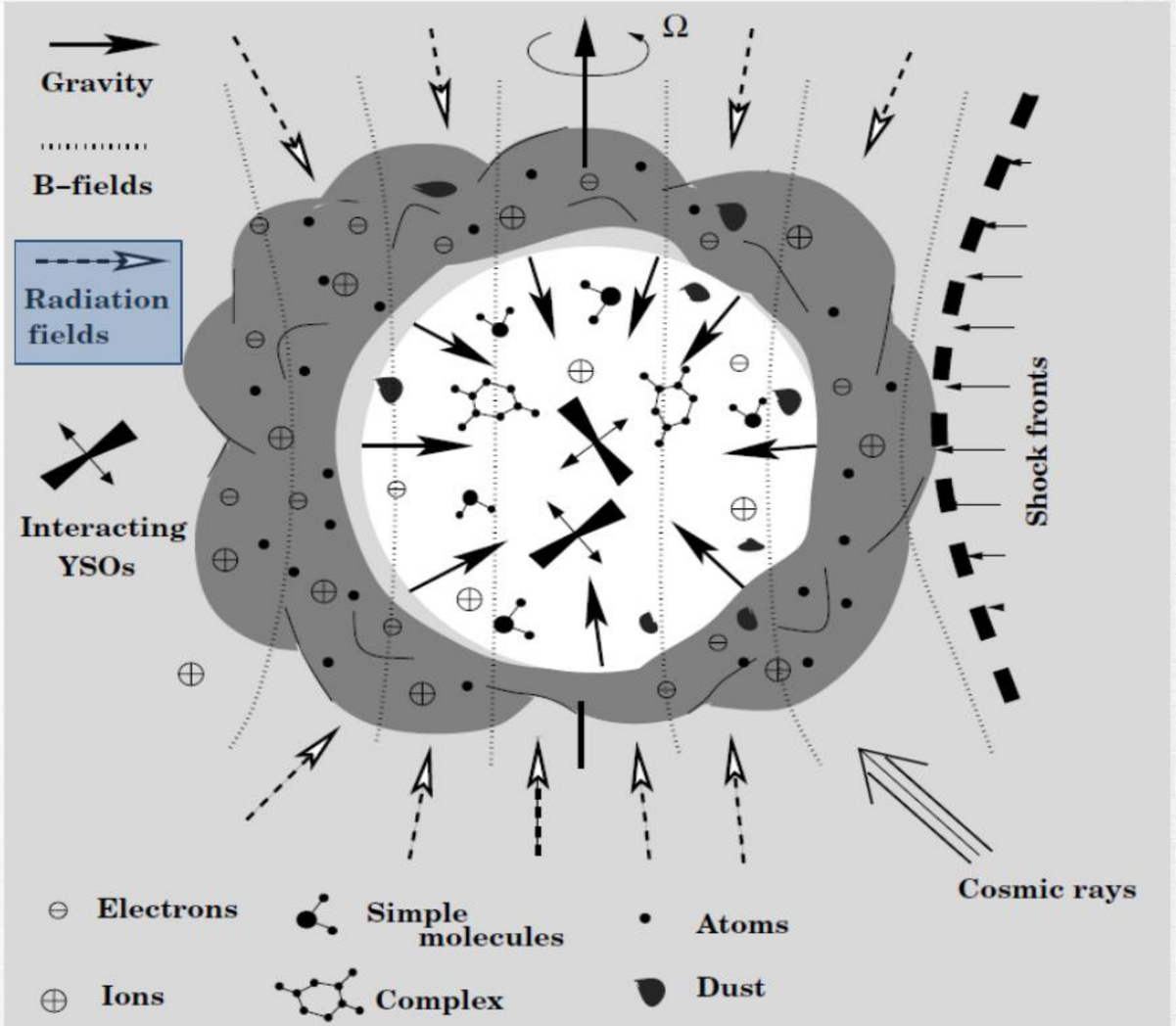
- **Междузвезден газ**: йони, атоми и молекули в газовата компонента.
- **Междузвезден прах**: малки твърди прашинки (< 1 μm) смесени с газовата фаза.
- **Космично лъчение**: йони и електрони с релативистки енергии, много по-големи от топлинната ($E > 10^2 - 10^{11}$ GeV).
- **Електромагнитно лъчение**:
  - КМФ
  - Излъчване от звездите
  - Спектрални линии на йони, атоми и молекули
  - Топлинно излъчване от междузвезден прах
  - Излъчване от свободно-свободни преходи в плазмена среда
  - Синхротронно излъчване от релативистични електрони
  - Гама лъчи.

- **Магнитно поле**: част от глобалното магнитно поле на Галактиката. Моделира МС чрез създаване на анизотропия в средата и оказва динамично действие срещу гравитацията.
- **Гравитационно поле**



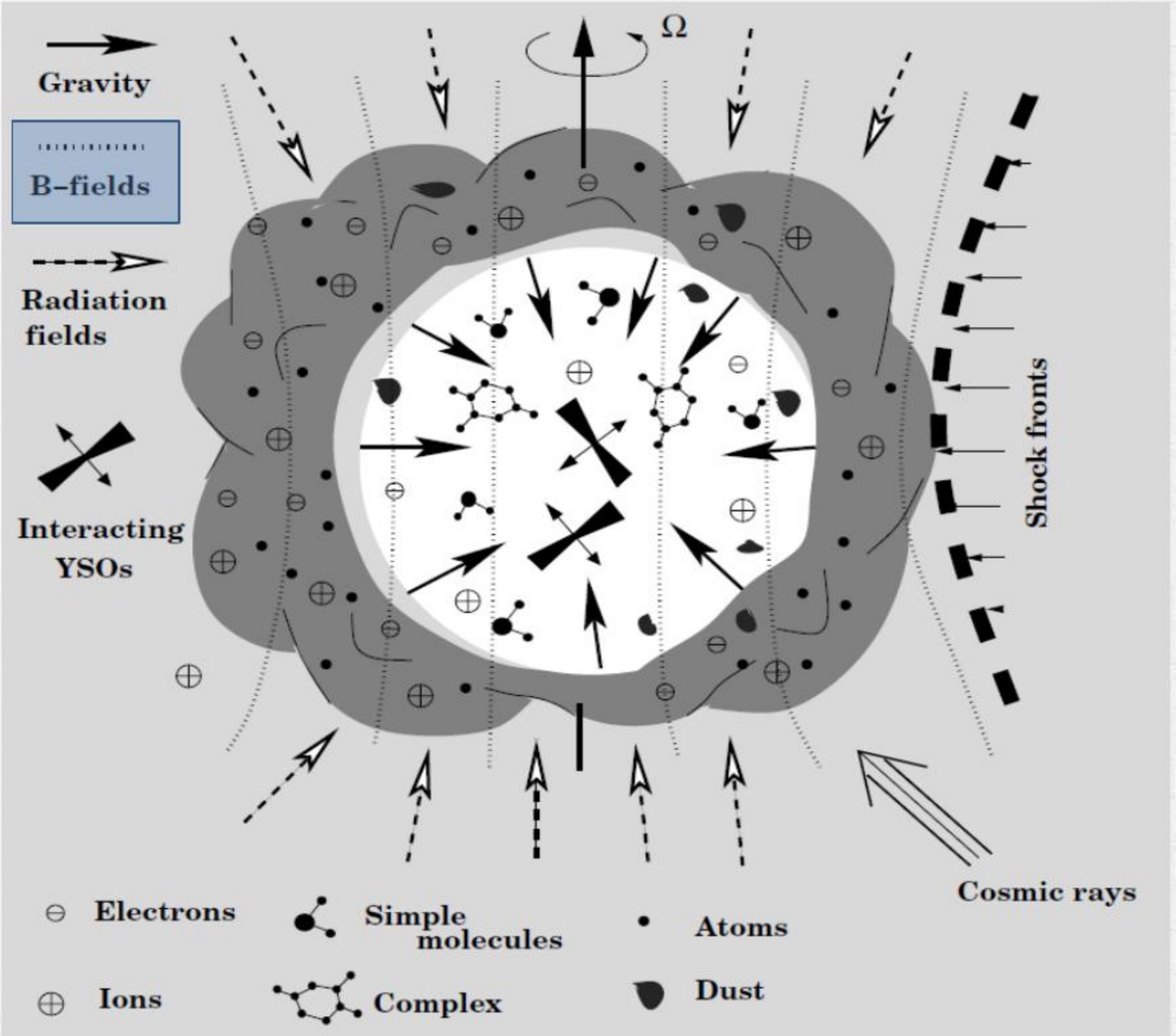
- **Междузвезден газ**: йони, атоми и молекули в газовата компонента.
- **Междузвезден прах**: малки твърди прашинки (< 1 μm) смесени с газовата фаза.
- **Космично лъчение**: йони и електрони с релативистки енергии, много по-големи от топлинната ($E > 10^2 - 10^{11}$ GeV).
- **Електромагнитно лъчение**:
  - КМФ
  - Излъчване от звездите
  - Спектрални линии на йони, атоми и молекули
  - Топлинно излъчване от междузвезден прах
  - Излъчване от свободно-свободни преходи в плазмена среда
  - Синхротронно излъчване от релативистични електрони
  - Гама лъчи.

- **Магнитно поле**: част от глобалното магнитно поле на Галактиката. Моделира МС чрез създаване на анизотропия в средата и оказва динамично действие срещу гравитацията.
- **Гравитационно поле**

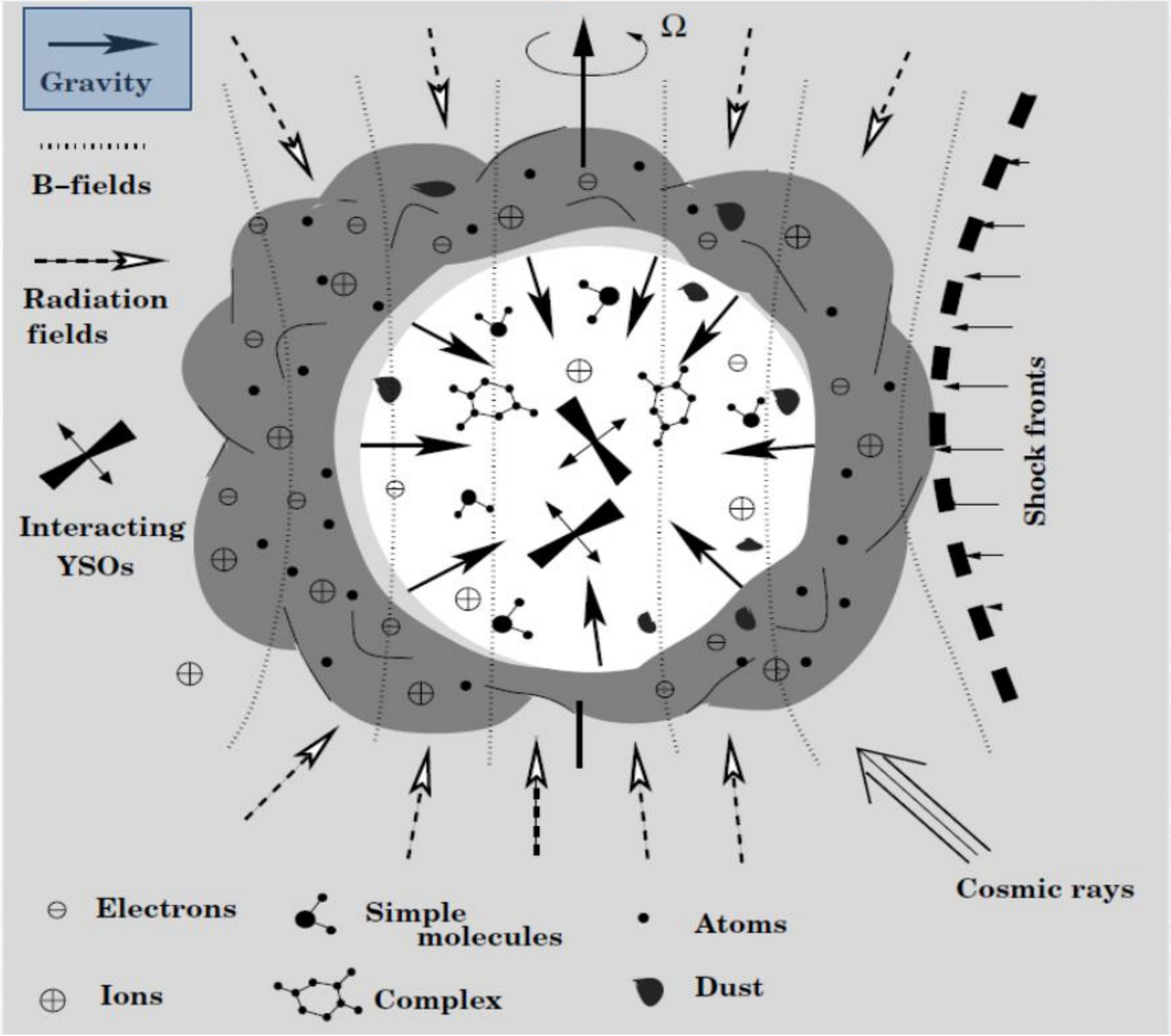


- **Междузвезден газ**: йони, атоми и молекули в газовата компонента.
- **Междузвезден прах**: малки твърди прашинки (< 1 μm) смесени с газовата фаза.
- **Космично лъчение**: йони и електрони с релативистки енергии, много по-големи от топлинната ($E > 10^2 - 10^{11}$ GeV).
- **Електромагнитно лъчение**:
  - КМФ
  - Излъчване от звездите
  - Спектрални линии на йони, атоми и молекули
  - Топлинно излъчване от междузвезден прах
  - Излъчване от свободно-свободни преходи в плазмена среда
  - Синхротронно излъчване от релативистични електрони
  - Гама лъчи.

- **Магнитно поле**: част от глобалното магнитно поле на Галактиката. Моделира МС чрез създаване на анизотропия в средата и оказва динамично действие срещу гравитацията.
- **Гравитационно поле**



- **Междузвезден газ**: йони, атоми и молекули в газовата компонента.
- **Междузвезден прах**: малки твърди прашинки (< 1 μm) смесени с газовата фаза.
- **Космично лъчение**: йони и електрони с релативистки енергии, много по-големи от топлинната ($E > 10^2 - 10^{11}$ GeV).
- **Електромагнитно лъчение**:
  - КМФ
  - Излъчване от звездите
  - Спектрални линии на йони, атоми и молекули
  - Топлинно излъчване от междузвезден прах
  - Излъчване от свободно-свободни преходи в плазмена среда
  - Синхротронно излъчване от релативистични електрони
  - Гама лъчи.
- **Магнитно поле**: част от глобалното магнитно поле на Галактиката. Моделира МС чрез създаване на анизотропия в средата и оказва динамично действие срещу гравитацията.
- **Гравитационно поле**



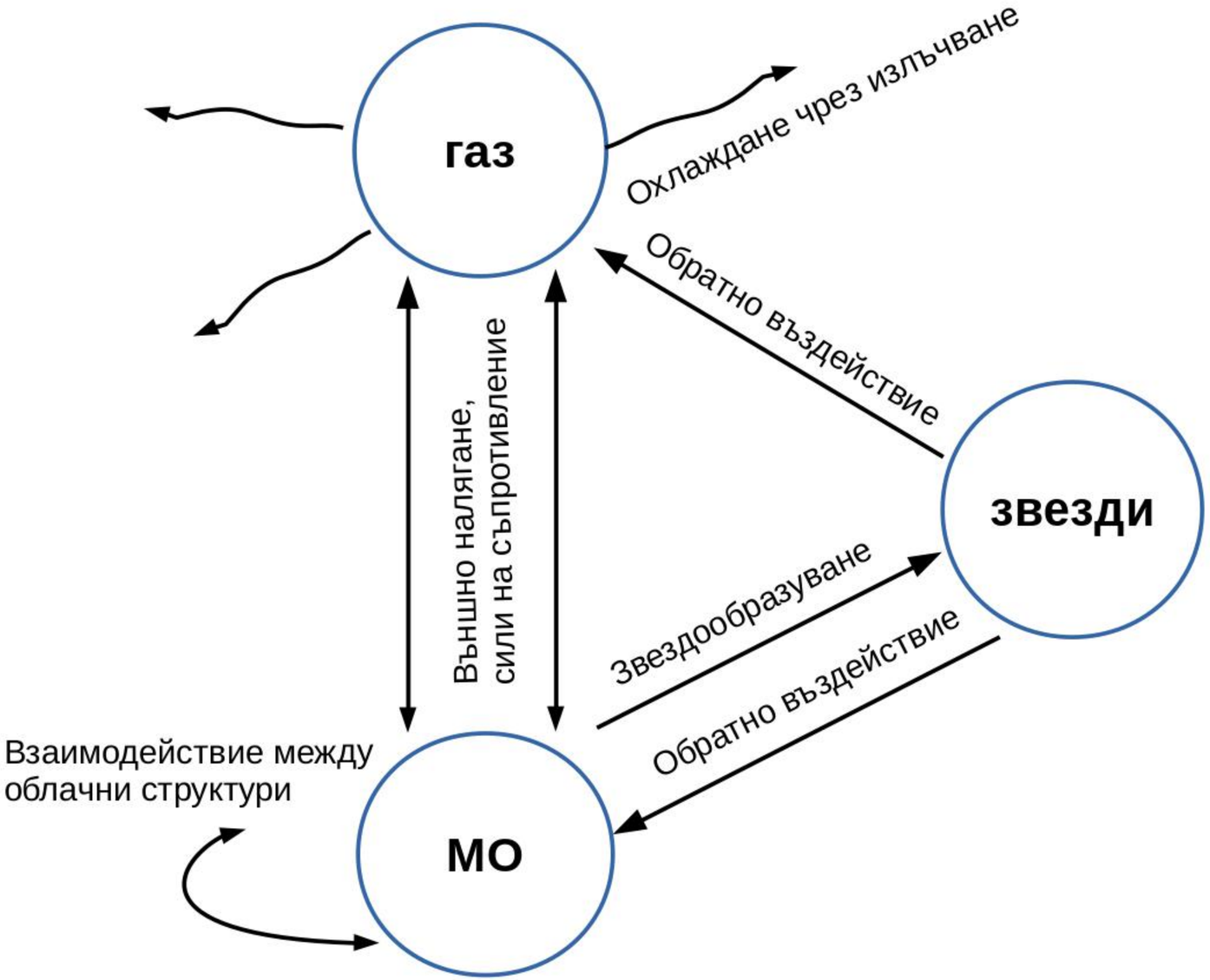
Мъглявината M16 (Орел, Eagle Nebula)




Мъглявината IC 1805

Процеси на нагряване / охлаждане





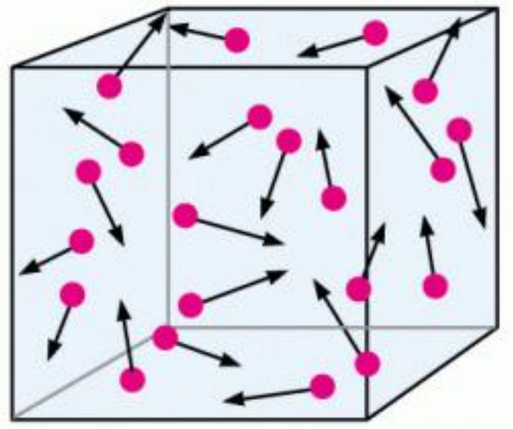
Процеси на нагряване в междузвездната среда

- **Механично ”макроскопично” нагряване**:
  - **Турбулентност** и разпространение на **ударни вълни** от избухване на свръхнови /или мощни **звездни ветрове**
  - **Взаимодействие** между отделни облачни фрагменти
  - Компресия на газ, триене

- **Микроскопично нагряване**:
  - **Фотойонизация** на H, HE, C, MG, SI, FE, … от UV лъчение (локално ли от общото радиационно поле на Галактиката)
  - **Йонизация** на H, HE (и по-тежки елементи) **от космични лъчи**
  - **Фотойонизация** на H и HE **от рентгенови лъчи**
  - **Фотоелектрично нагряване** - фотойонизация **на повърхността на прахова частица** от UV лъчи от млади горещи звезди.

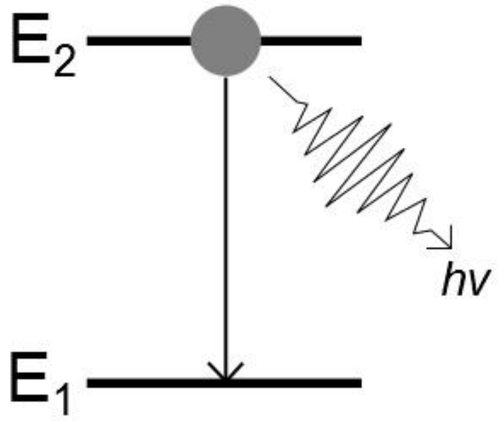
Процеси на охлаждане

Кинетична енергия





лъчение



$$A + B \longrightarrow A + B^*$$

$$B^* \longrightarrow B + h\nu$$

Мета-стабилно състояние
на ***B***

ГЛ. АС. Д-Р ОРЛИН СТАНЧЕВ, КАТЕДРА “АСТРОНОМИЯ”, СУ “СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ”

Колко празно е междузвездното пространство

Къде и как се раждат звездите?

КОСМИЧЕСКИ УИКЕНД, 02 - 03.11.2024Г. ПРИРОДОНАУЧЕН МУЗЕЙ ЧЕРНИ ОСЪМ

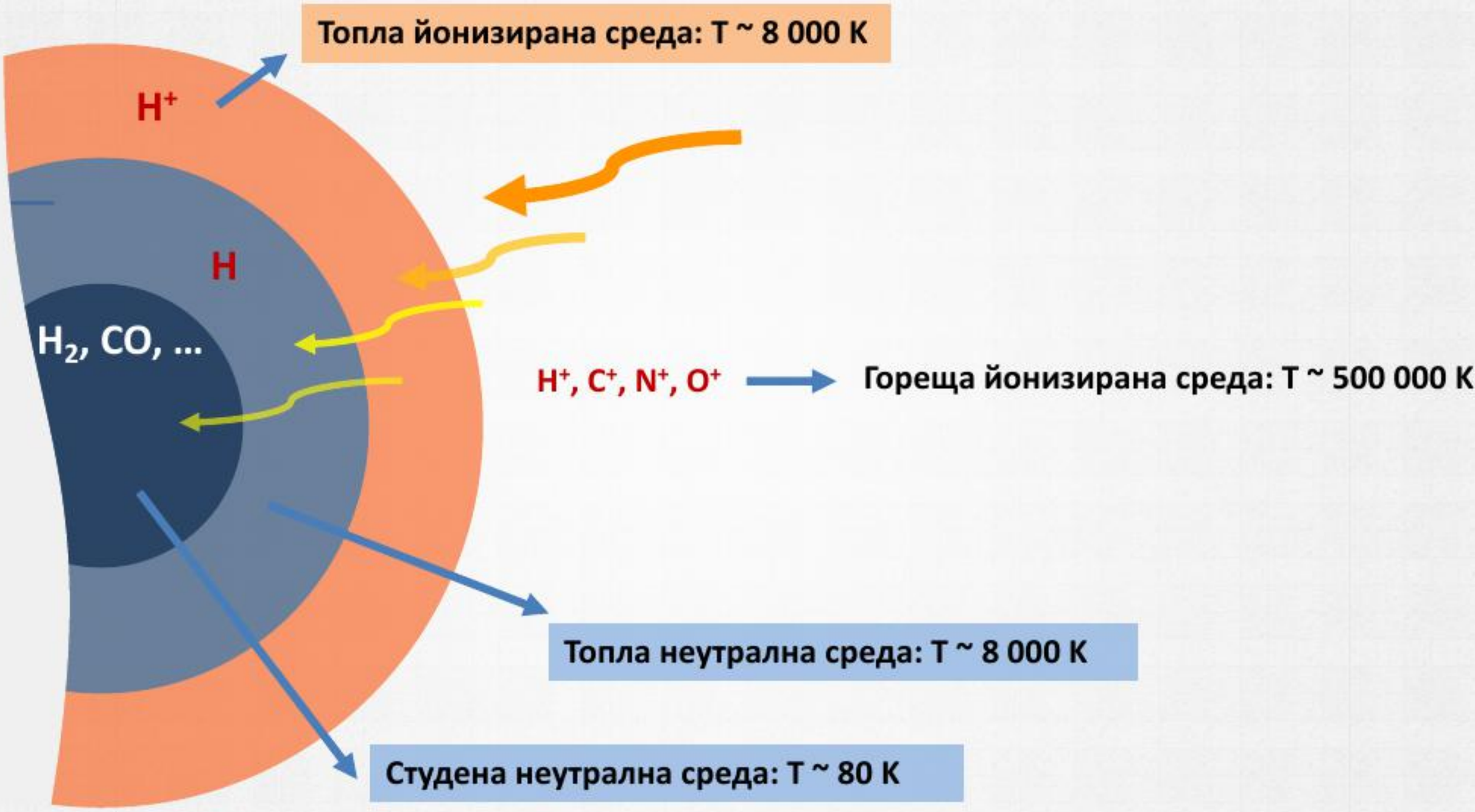
План на презентацията

- Какво наричаме междузвездна среда?
- Кратка история на изследванията на междузвездната среда.
- Кои фактори определят физиката на междузвездната среда?
- Състав, свойства и компоненти.
- Роля на гравитацията и турбулентността за физиката на молекулярните облаци.


Мъглявината IC 1805

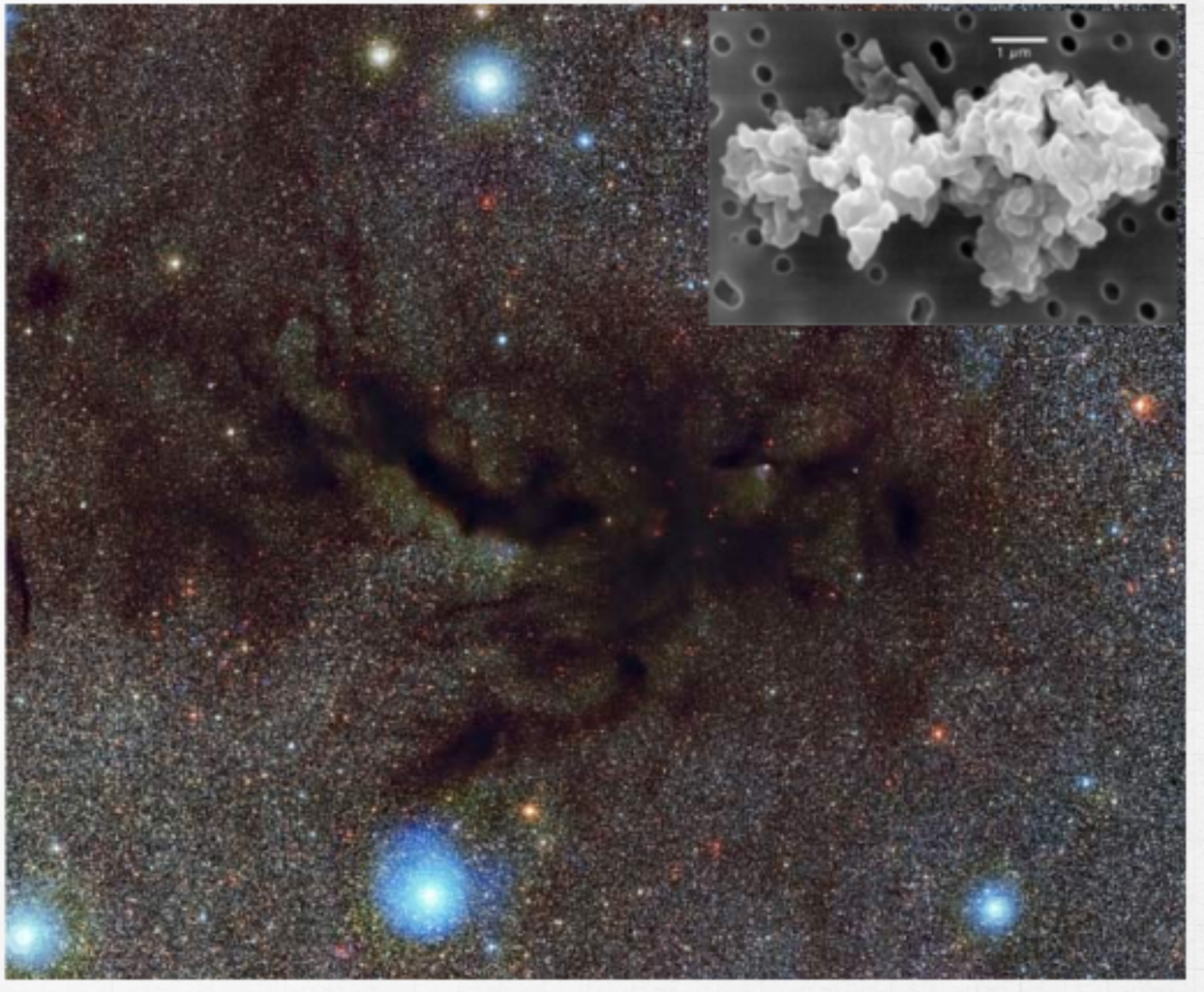
Фази на МС: процеси на нагряване




Топла йонизирана среда: T ~ 8 000 K
H+
H
H2, CO, …
H+, C+, N+, O+
Гореща йонизирана среда: T ~ 500 000 K
Топла неутрална среда: T ~ 8 000 K
Студена неутрална среда: T ~ 80 K

Допълнителна компонента на МС: Междузвезден прах

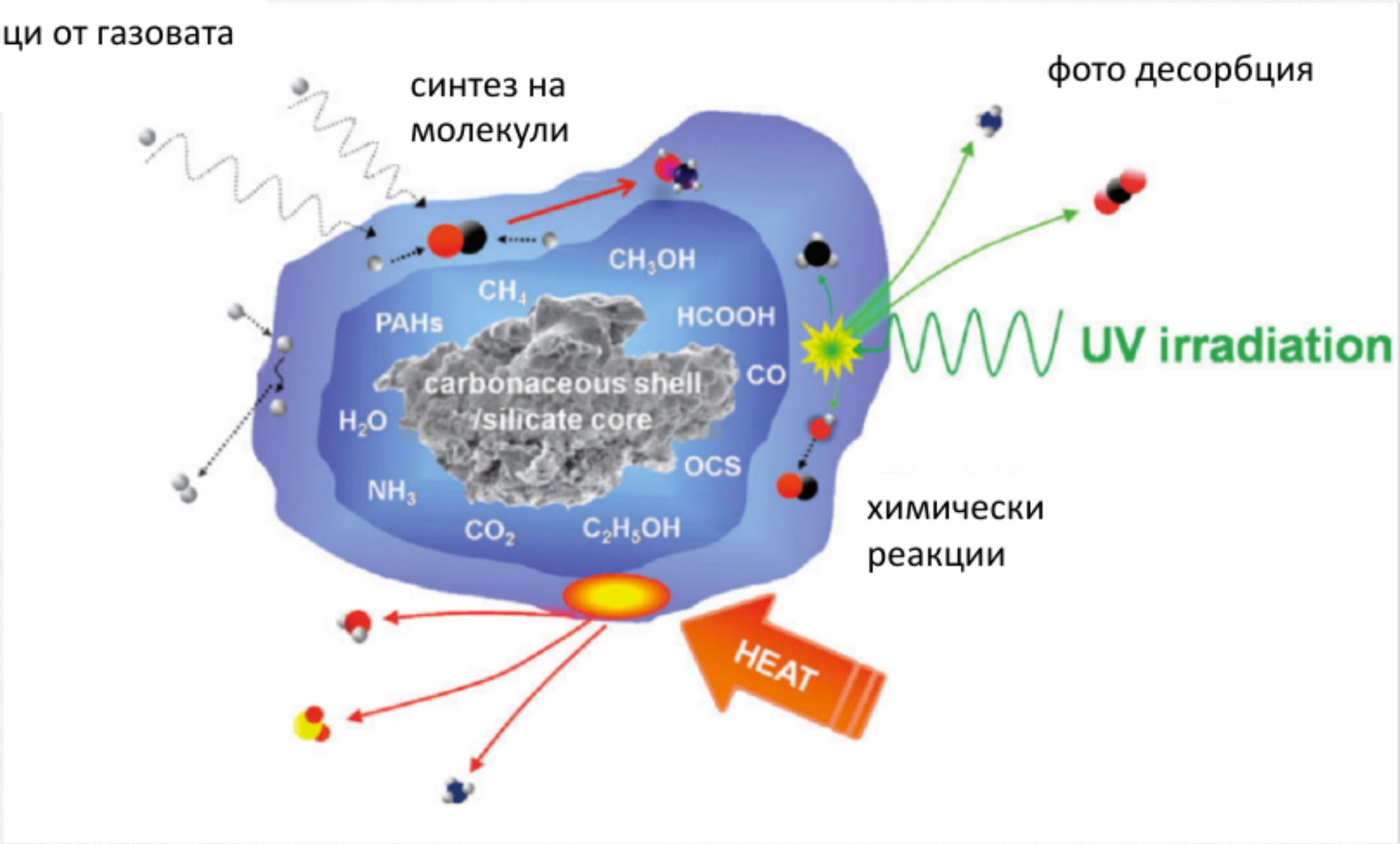
- **Въпреки, че междузвездния прах формира около 1 % от масата на МС, неговата роля за химията и структурата на на средата е ключова:**
  - Екранира вътрешните области на молекулните облаци от UV лъчение
  - Абсорбция на UV+видима светлина и преизлъчване в инфрачервения диапазон
  - Химични реакции на повърхността на праховите частици ($2H \rightarrow H_2$)
  - Учавства в процеси на охлаждане в плътните зони на молекулните облаци



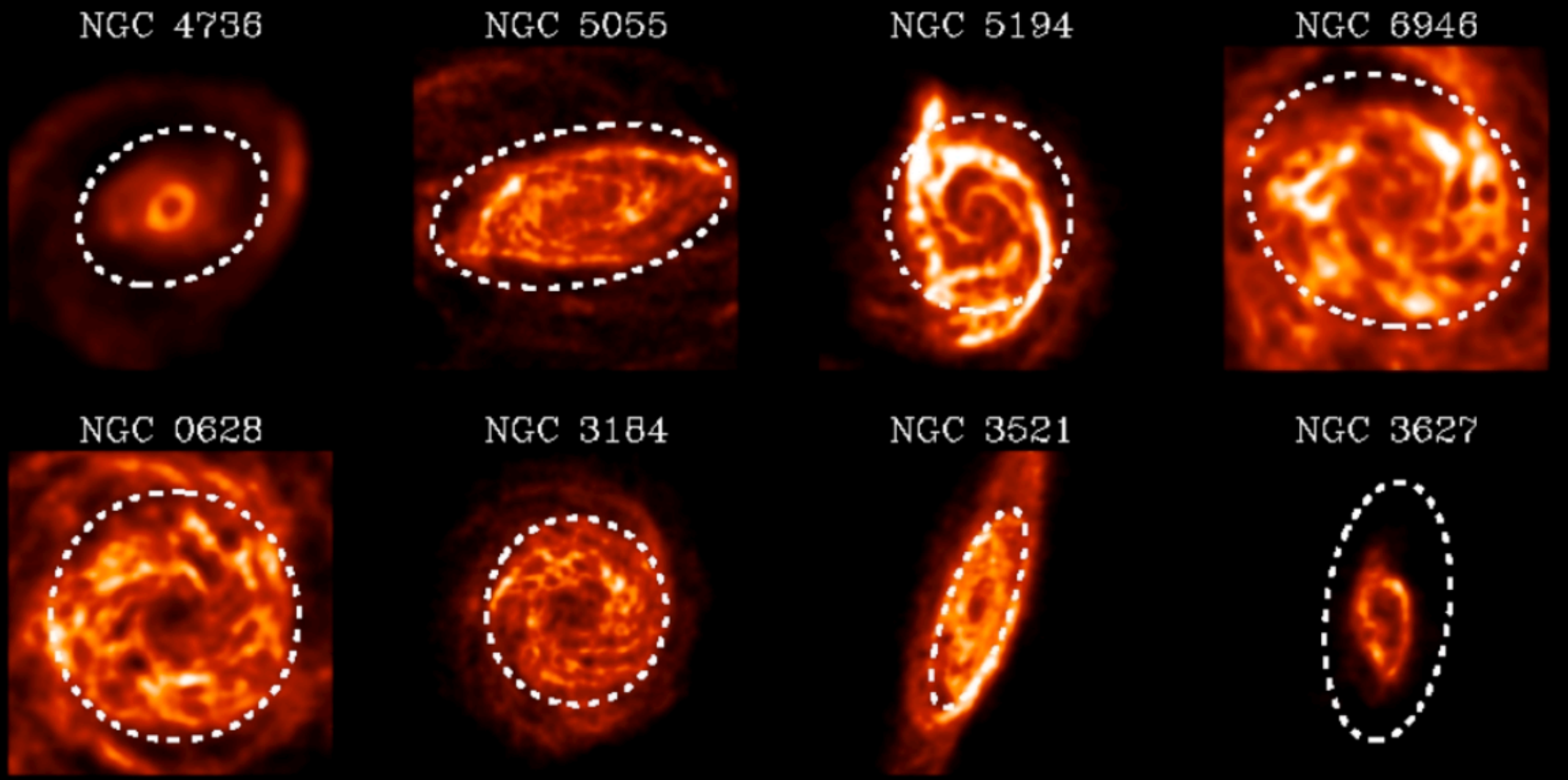
Катализа на повърхността на прахова частица

$$H + H + \text{grain} \rightarrow H_2 + \text{grain}$$

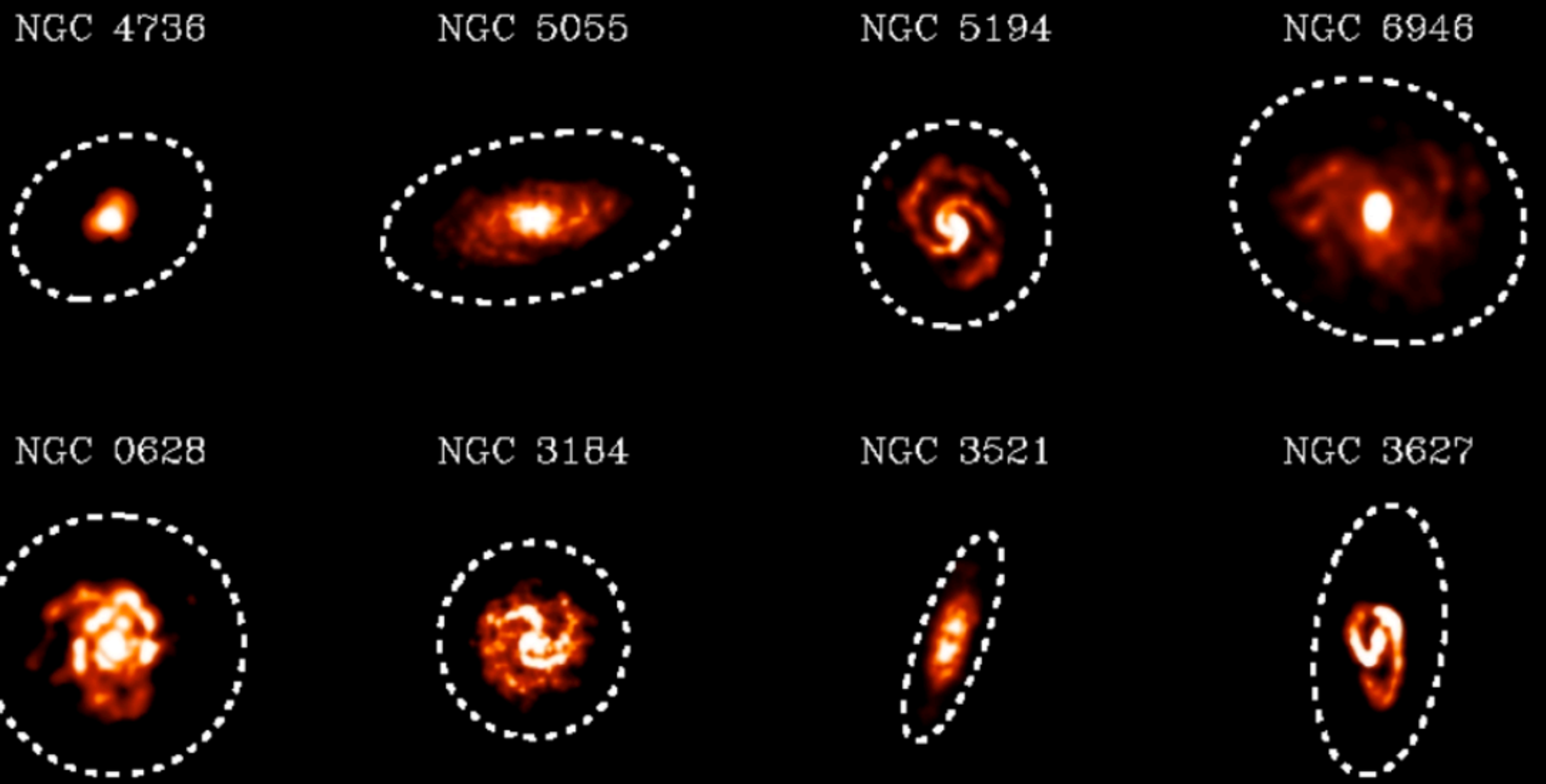
частици от газовата фаза



разпределение на HI (неутралния водород)



разпределение на H_2 (молекулярния водород)



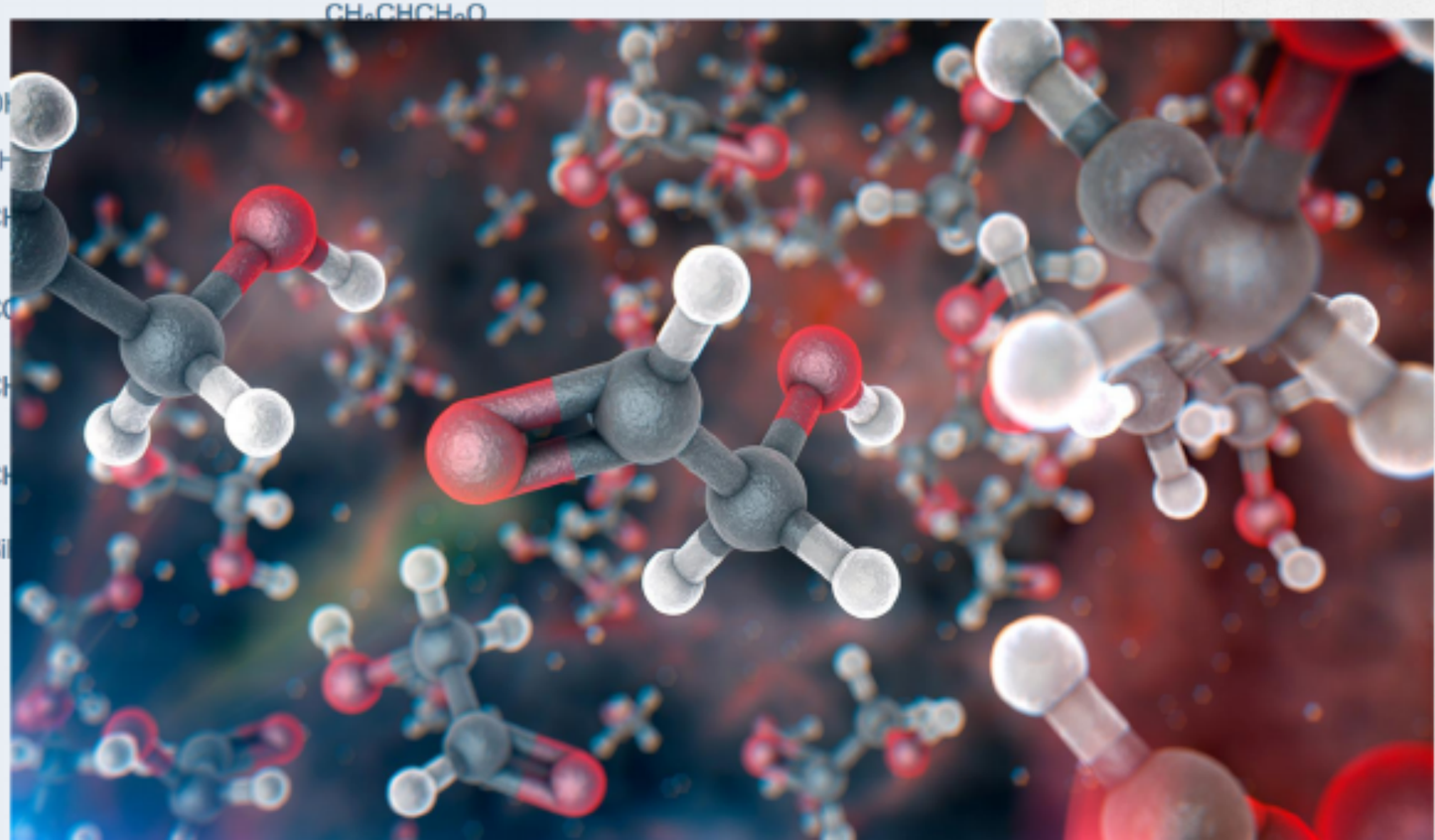
Но всъщност ние „не виждаме“ H_2 молекулата !



Молекули в МС

Molecules in the Interstellar Medium or Circumstellar Shells (as of 10/2017)

2 atoms	3 atoms	4 atoms	5 atoms	6 atoms	7 atoms	8 atoms	9 atoms	10 atoms	11 atoms	12 atoms	>12 atoms
H_2	C_3 *	*c*-C_3H	C_5 *	C_5H	C_6H	CH_3C_3N	CH_3C_4H	CH_3C_5N	HC_9N	*c*-C_6H_6 *	$HC_{11}N$?
AlF	C_2H	*l*-C_3H	C_4H	*l*-H_2C_4	CH_2CHCN	$HC(O)OCH_3$	CH_3CH_2CN	$(CH_3)_2CO$	CH_3C_6H	*n*-C_3H_7CN	C_{60} *
AlCl	C_2O	C_3N	C_4Si	C_2H_4*	CH_3C_2H	CH_3COOH	$(CH_3)_2O$	$(CH_2OH)_2$	C_2H_5OCHO	*i*-C_3H_7CN	C_{70} *
C_2**	C_2S	C_3O	*l*-C_3H_2	CH_3CN	HC_5N	C_7H	CH_3CH_2OH	CH_3CH_2CHO	$CH_3OC(O)CH_3$	$C_2H_5OCH_3$?	C_{60}^+ *
CH	CH_2	C_3S	*c*-C_3H_2	CH_3NC	CH_3CHO	C_6H_2		CH_3CHCH_2O			
CH^+	HCN	C_2H_2*	H_2CCN	CH_3OH	CH_3NH_2	CH_2OH					
CN	HCO	NH_3	CH_4 *	CH_3SH	*c*-C_2H_4O	*l*-HC_6H					
CO	HCO^+	HCCN	HC_3N	HC_3NH^+	H_2CCHOH	CH_2CH (?)					
CO^+	HCS^+	$HCNH^+$	HC_2NC	HC_2CHO	C_6H^-	CH_2CC					
CP	HOC^+	HNCO	HCOOH	NH_2CHO	CH_3NCO 2015	H_2NCH					
SiC	H_2O	HNCS	H_2CNH	C_5N	HC_5O 2017	CH_3CH					
HCl	H_2S	$HOCO^+$	H_2C_2O	*l*-HC_4H *		CH_3Si 2017					
KCl	HNC	H_2CO	H_2NCN	*l*-HC_4N							
NH	HNO	H_2CN	HNC_3	*c*-H_2C_3O							
NO	MgCN	H_2CS	SiH_4 *	H_2CCNH (?)							
NS	MgNC	H_3O^+	H_2COH^+	C_5N^-							



Можем ли да видим всички тези фази (състояния) на междузвездната среда?





Какво липсва в картинката ?

лъчение +

нагряване +

охлаждане +

?

Намаляване на размерната скала / нарастване на плътността

Размер: около 100 000 св. год



Плътност: няколко частици на cm^3

Размер: около 50 св. год.



Плътност: няколко СТОТИН частици на cm^3

Размер: около 5 св. год.



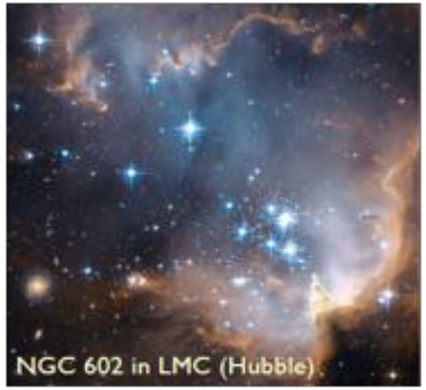
Размер: около 1 500 000 km = 0.0000002 св. год





Намаляване на размерната скала / нарастване на плътността







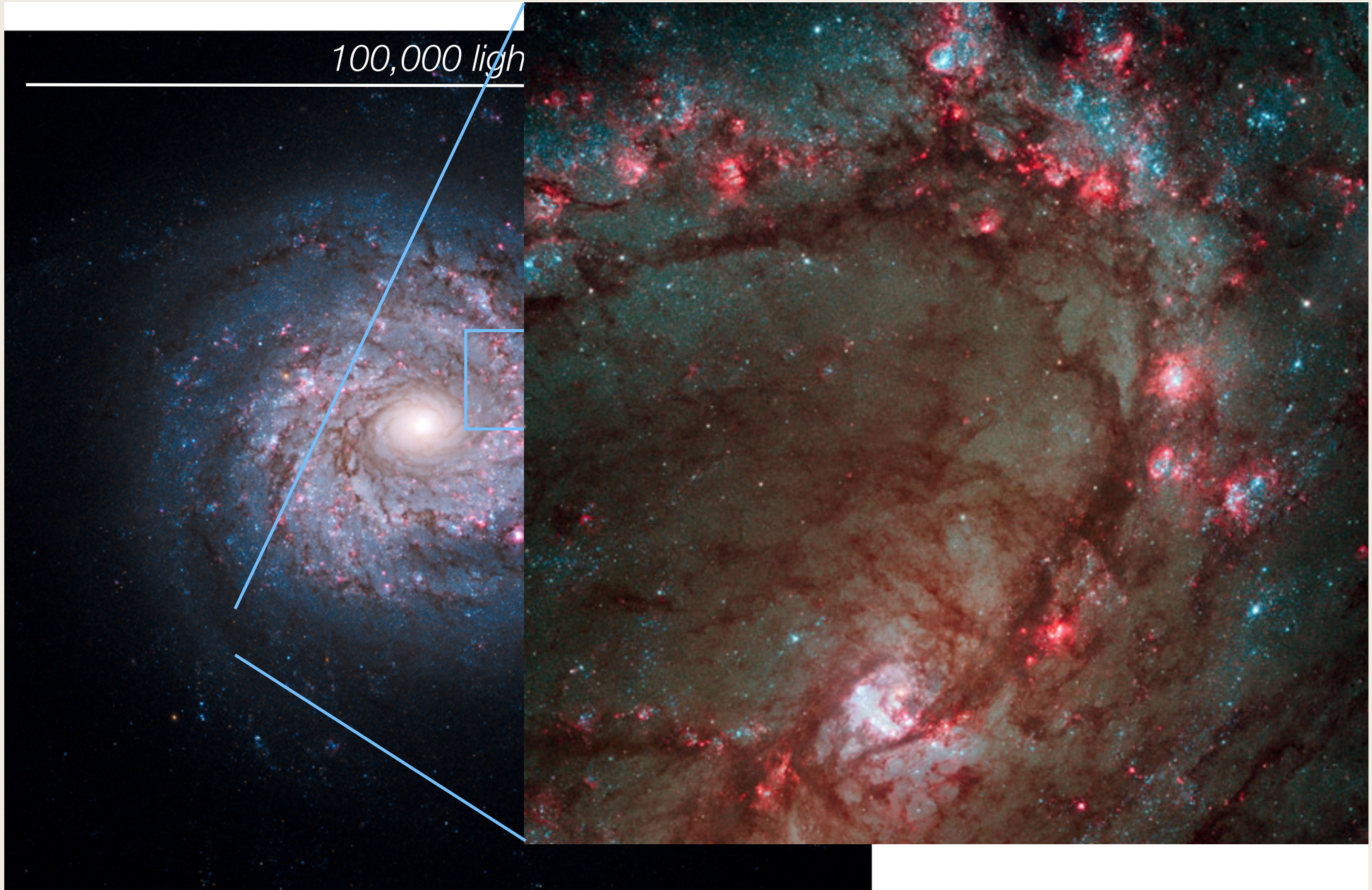




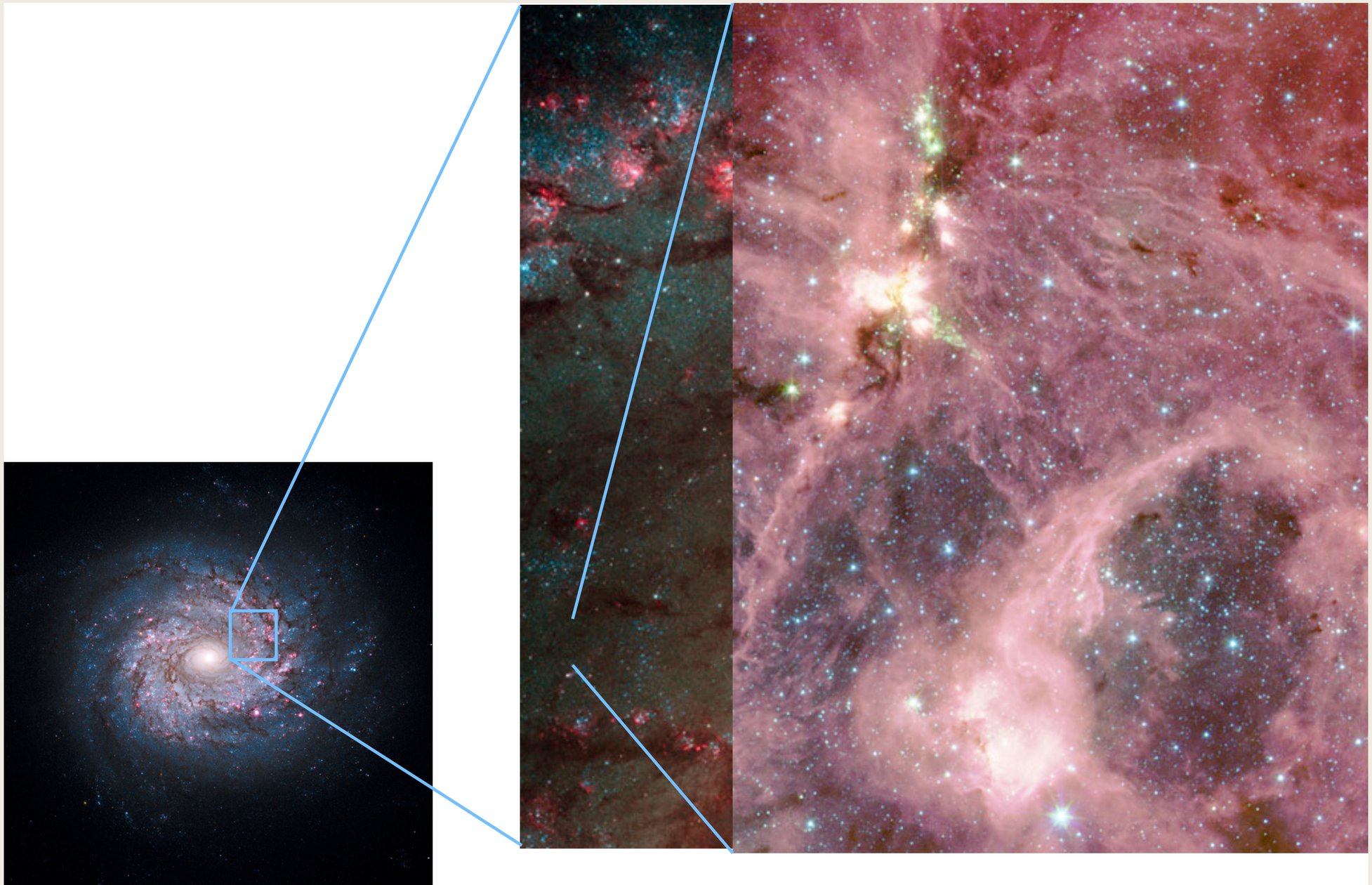
- Компресивно действие:
  - **Гравитация**

- Противодействащи сили:
  - Налягане на газа
  - **Турбулентност**
  - Магнитни полета
  - Лъчисто налягане

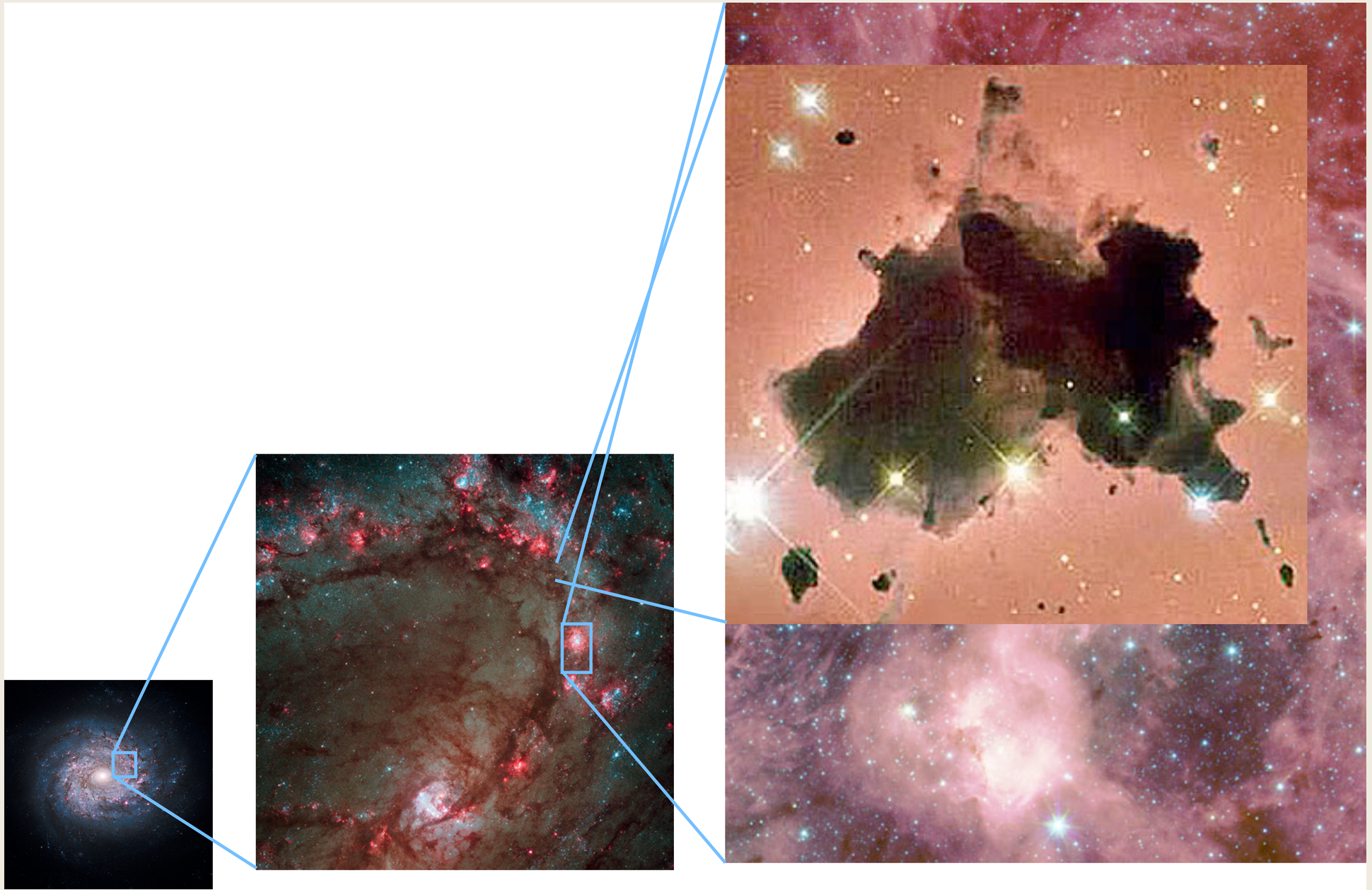
Гравитация + турбулентност = морфология на молекулярните облаци



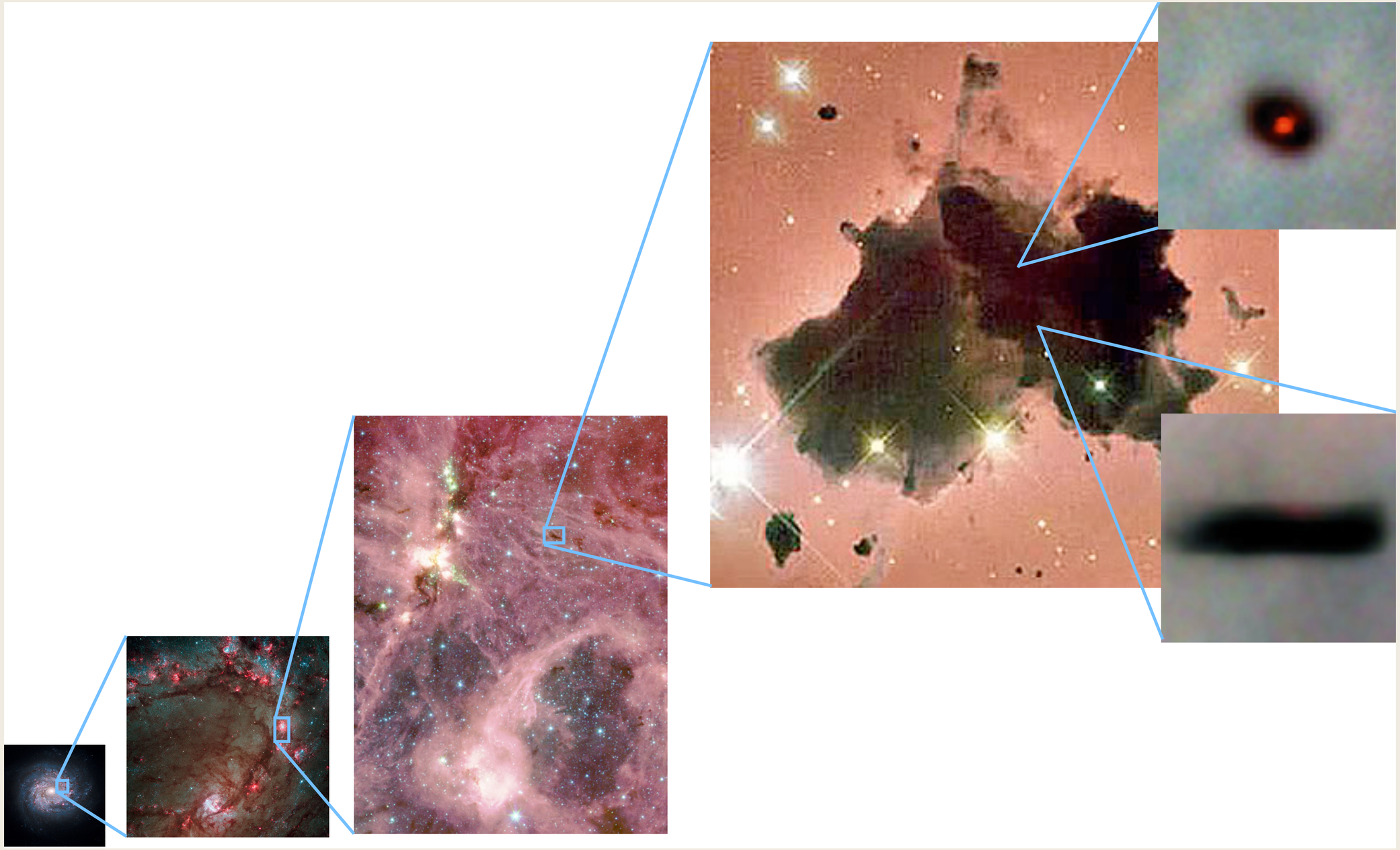
Гравитация + турбулентност = морфология на молекулярните облаци



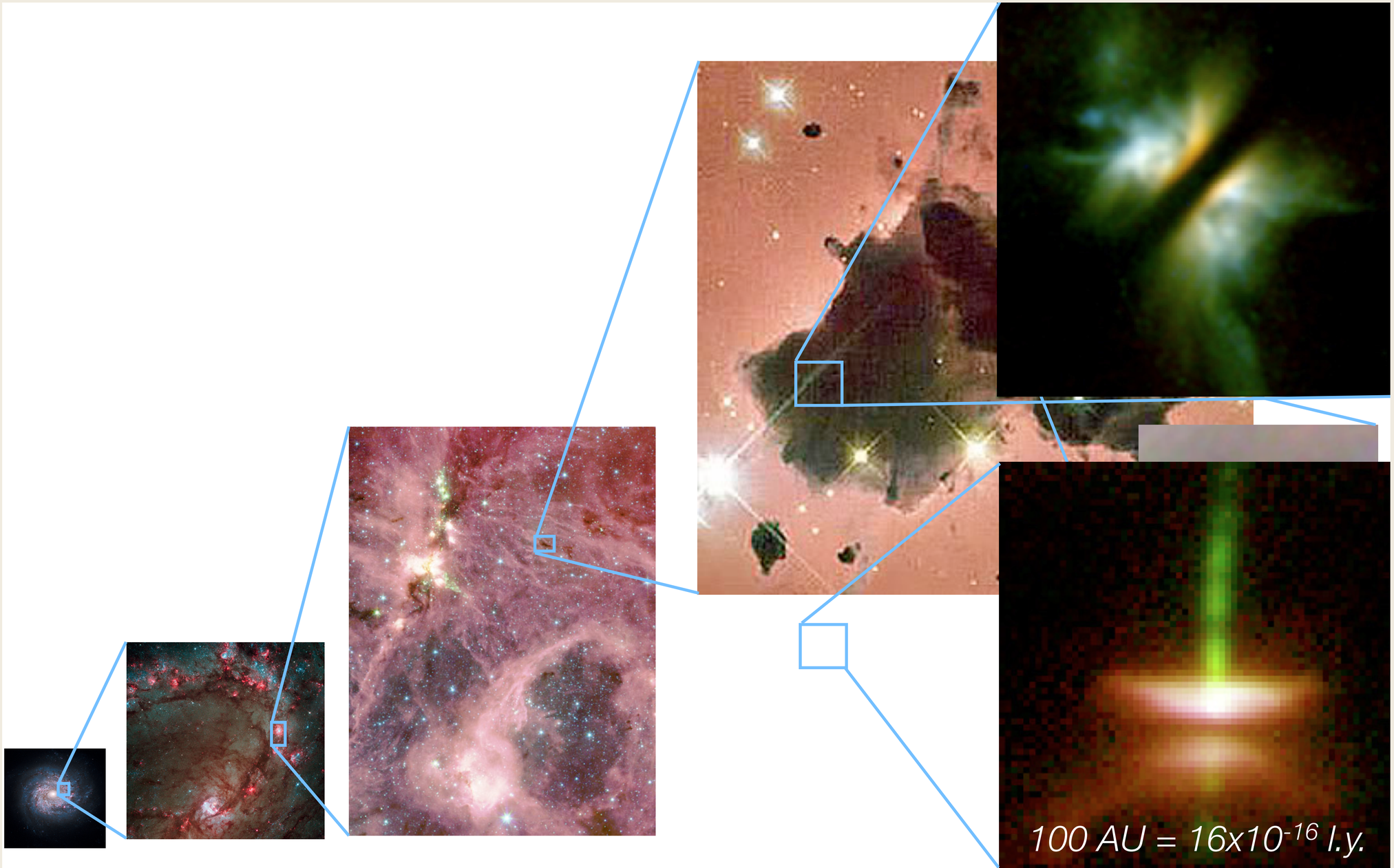
Гравитация + турбулентност = морфология на молекулярните облаци



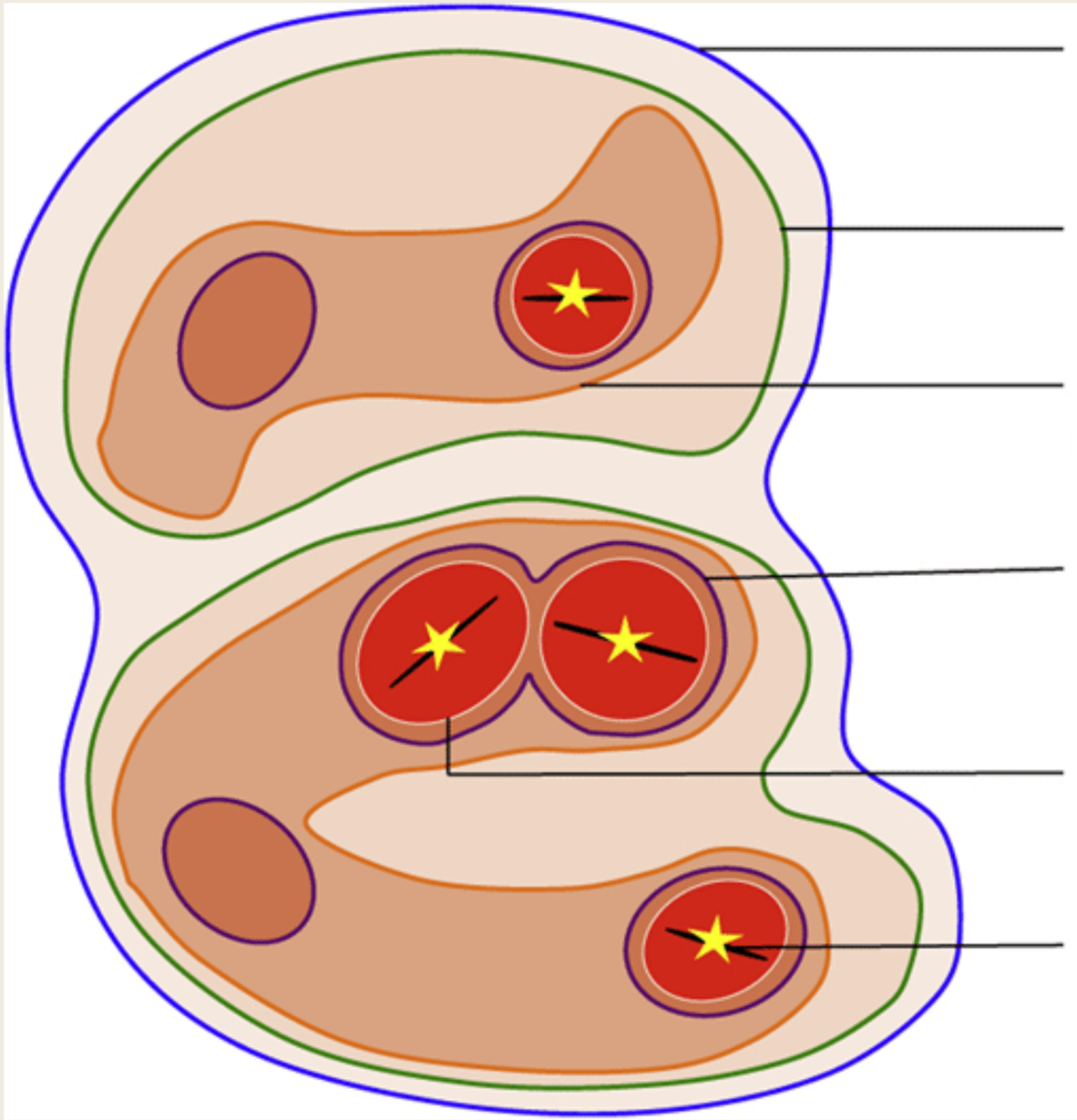
Гравитация + турбулентност = морфология на молекулярните облаци



Гравитация + турбулентност = морфология на молекулярните облаци



Гравитация + турбулентност = морфология на молекулярните облаци



Молекулярен облак (cloud) (> 10 pc)

Сгъстяване (clump) (~1 pc)

Влакно (filament) (~0.1 pc)

Ядро (core) (~0.05 - 0.1 pc)

Обвивка (envelope) (~300 - 3000 AU)

Диск + звезда (~10 - 200 AU)

Колко бързо колапсират молекулярните облаци?

$$t_{\rm ff} = (G\,\rho)^{-1/2}$$

Областите с по-голяма плътност колапсират по-бързо!

- За типичен молекулярен облак **t_{ff} ~ 1000 години** (т.е. много кратък интервал).
- Например **за Слънцето t_{ff} = 27 минути!**

Гравитационна фрагментация - фактори, които пречат на фрагментацията

- **Топлинно налягане на газа и турбулентност:** **свиването на фрагментите** от междузвезден газ и прах ги превръща в **оптически плътни** и това води до **повишаване на температурата и топлинното налягане**. Освен това известно е, че **молекулярните облаци се характеризират със свръхзвукова турбулентност** (много високи стойности на числото на Рейнолдс и числото на Мах!). **Всичко това води до прекратяване на процесите на фрагментация**.

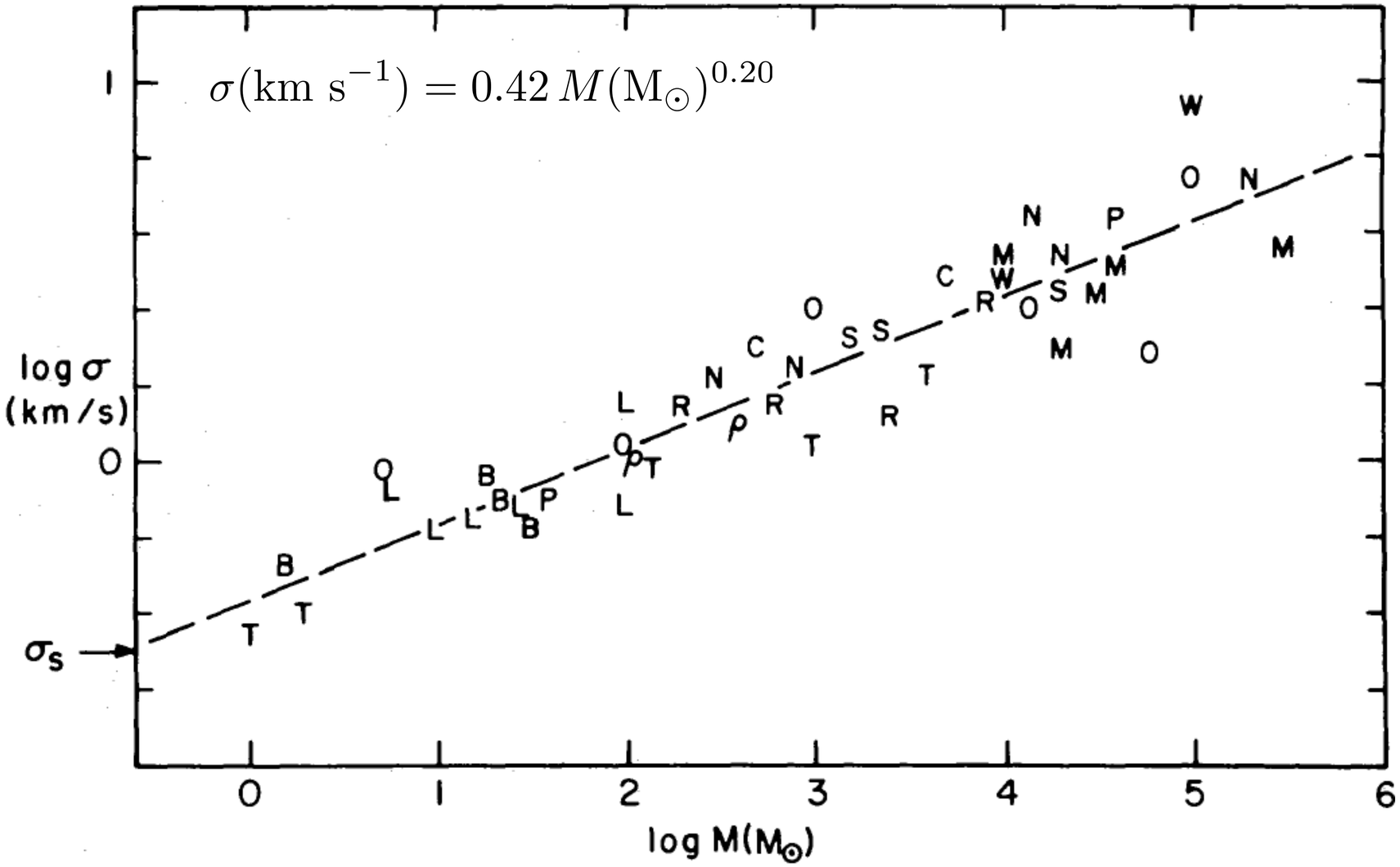
- **Магнитно налягане:** Изследванията на поляризацията на светлината породена от ориентацията на частиците междузвезден прах по силовите линии на магнитното поле показват, че молекулярните облаци са пронизани от магнитни полета. Обикновено се използва модела на "замръзналото" магнитно поле, при който йоните в средата се завличат по силовите линии на полето, а неутралната фракция от газа взаимодейства с йоните. **При гравитационен колапс, силовите линии на магнитното поле се свиват и оказват магнитно налягане (съпротивление) срещу гравитационното свиване, перпендикулярно на силовите лниии (но не и надлъжно на тях).** Това води до формирането на дискова структура.

Гравитационна фрагментация - фактори, които пречат на фрагментацията

- **Разпределение на момент на импулса:** Първоначално молекулярния облак притежава някакъв момент на импулса, т.е., **докато той колапсира, момента на импулса се запазва и облакът започва да се върти по-бързо**. **Това оказва съпротивление срещу гравитационния колапс !**

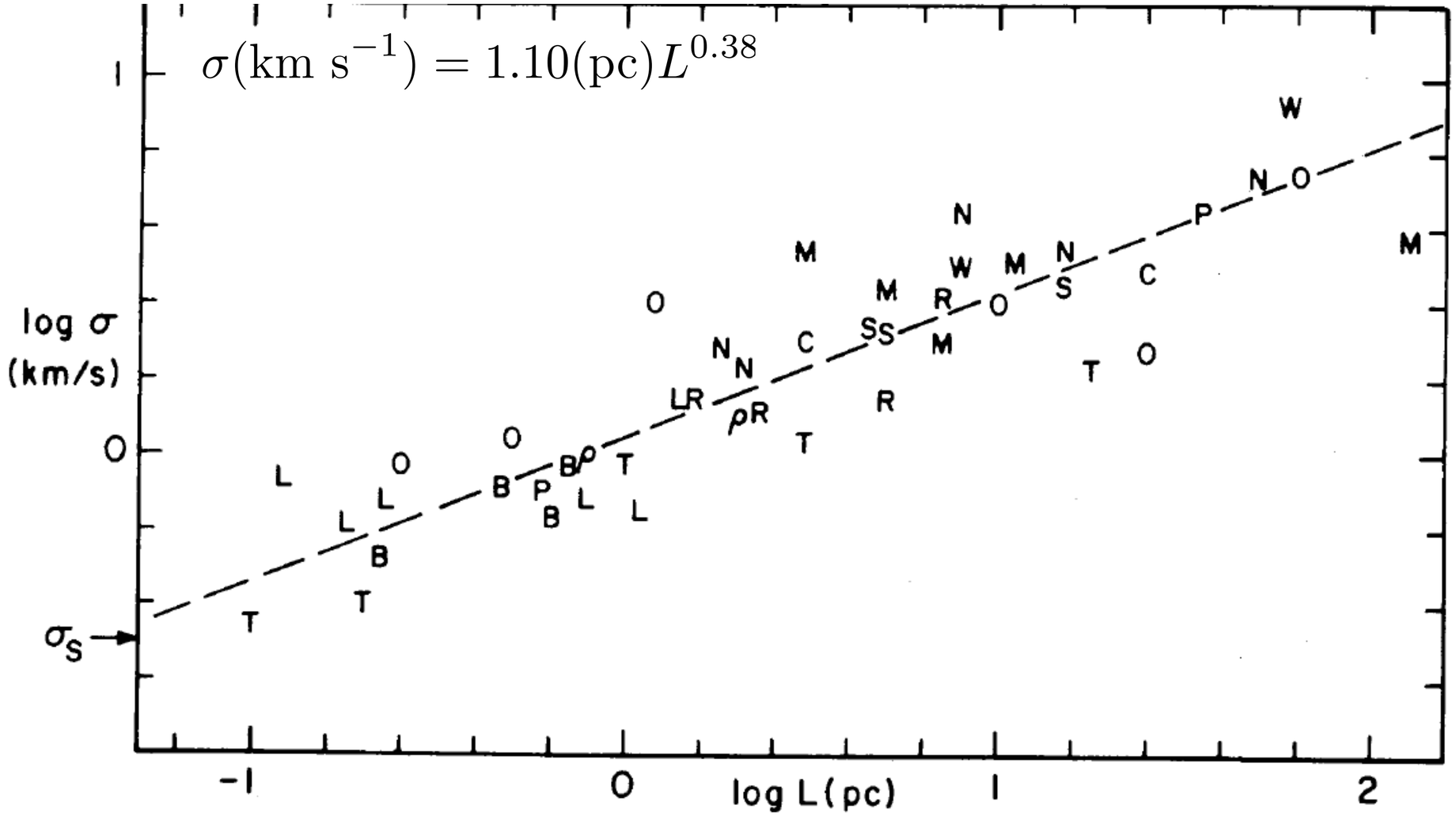
Гравитация: дисперсията на скоростите е пропорционална на масата на облака

Втори закони на Ларсон



Турбулентност: дисперсията на скоростите е пропорционална на размера на облака

Първи закон на Ларсон



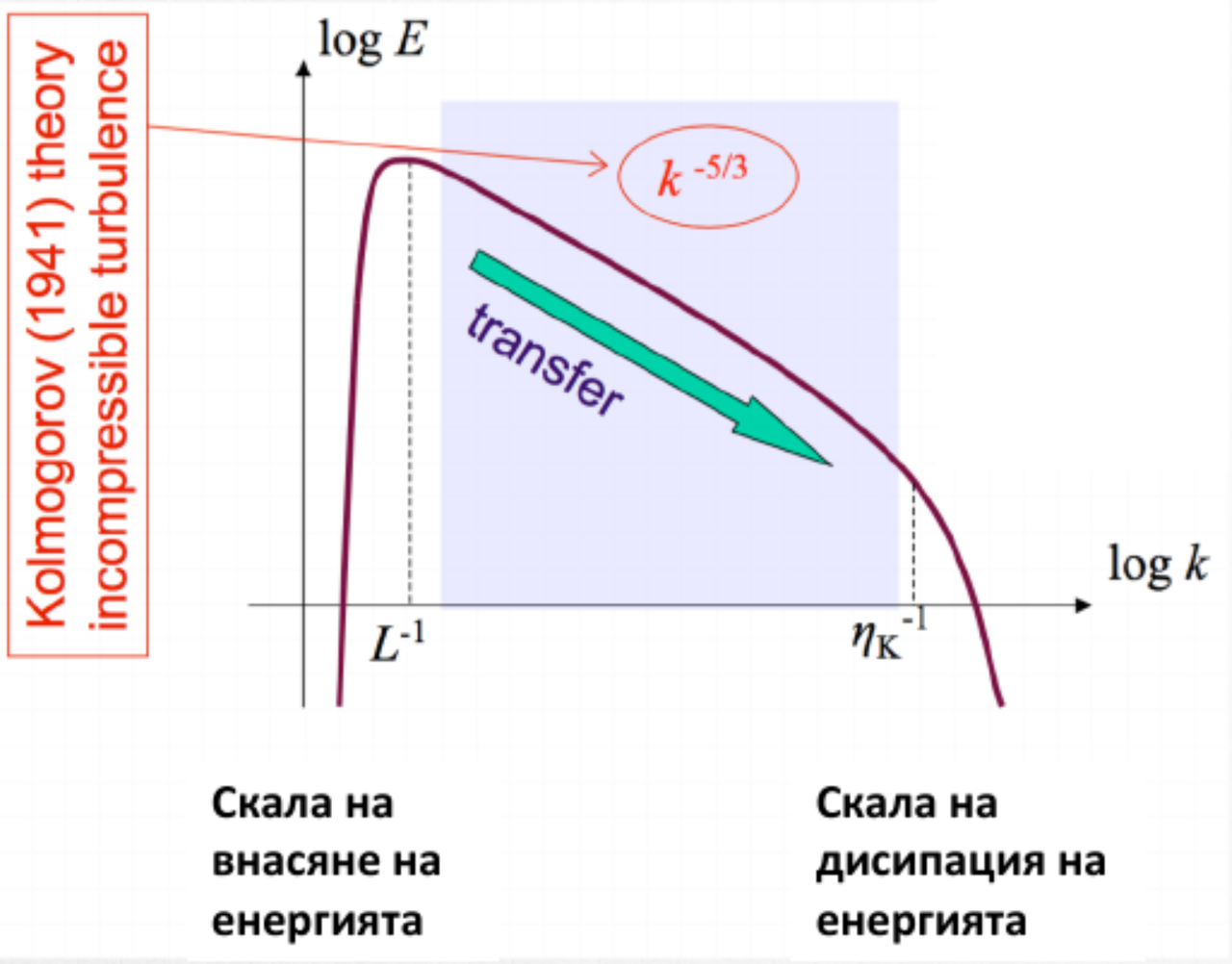




Да създадем турбулентност ☺

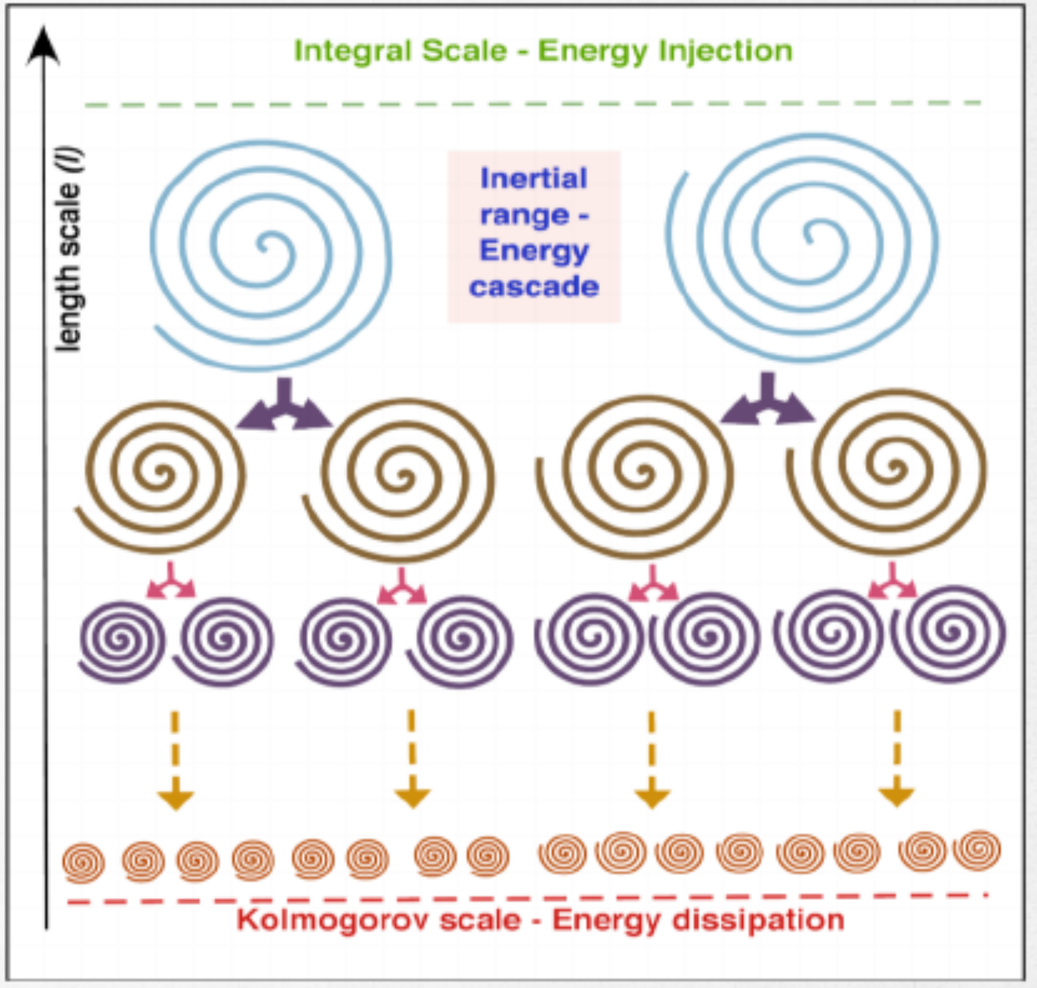


Защо турбулентността затихва?



Скала на внасяне на енергията

Скала на дисипация на енергията



Какво създава турбулентност в МС? ☺



Механизми за задвижване на турбулентност в МС



Значимост	Механизъм	Енергия на турбулентното задвижване $[\mathrm{erg.cm^{-3}.s^{-1}}]$
1	Свръхнови	3×10^{-26}
2	Ветрове (струи) от протозвезди	2×10^{-28}
3	Йонизиращо лъчение	5×10^{-29}
4	Гравитационна неустойчивост	4×10^{-29}
5	Магнитно-ротационна неустойчивост	3×10^{-29}

По-пълна физична картина ...

лъчение +

нагряване +

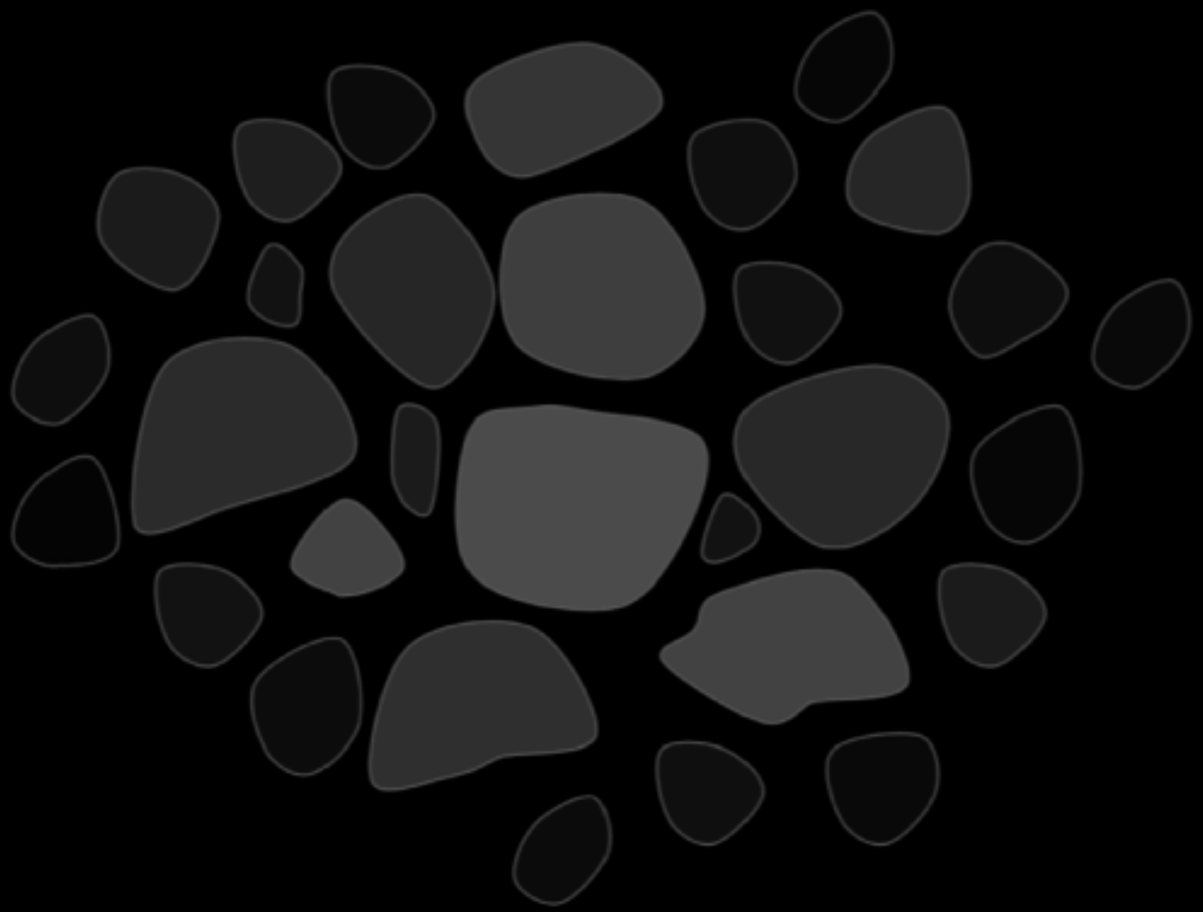
охлаждане +

гравитация +

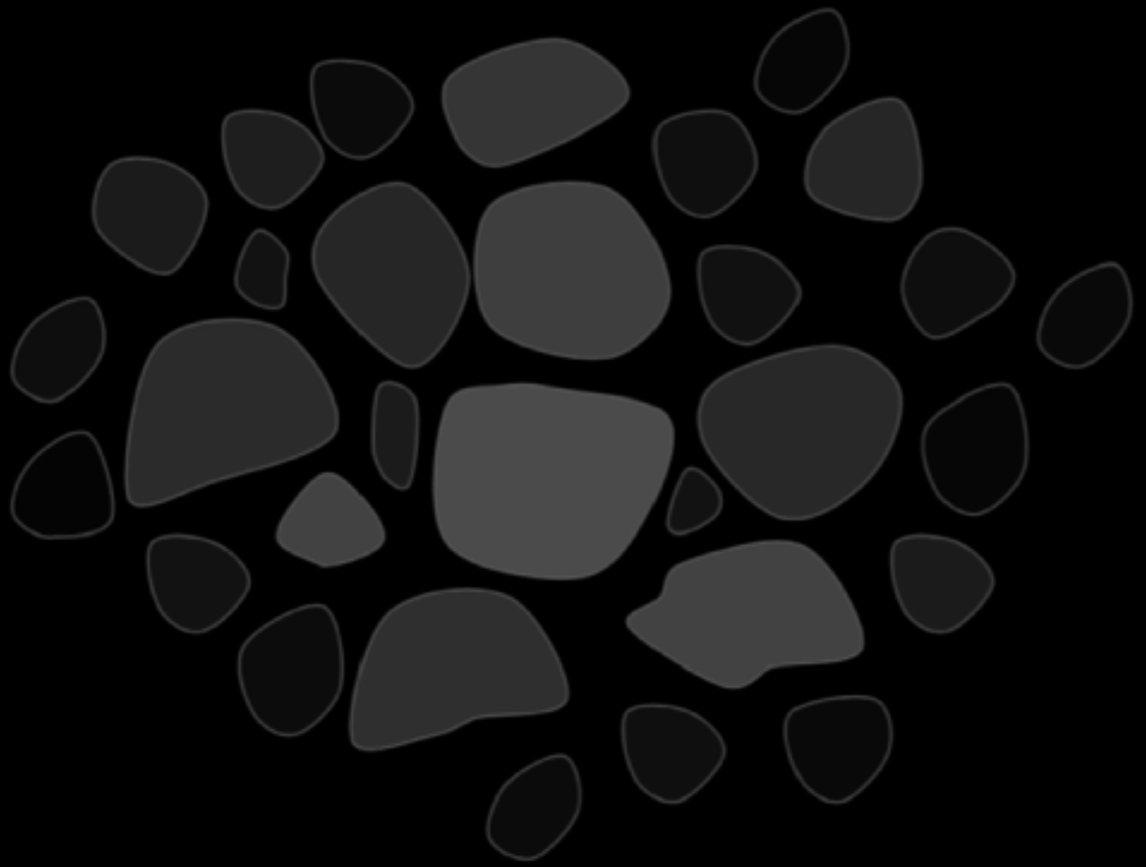
турбулентност

= Кръговрат на веществото в Галактиката

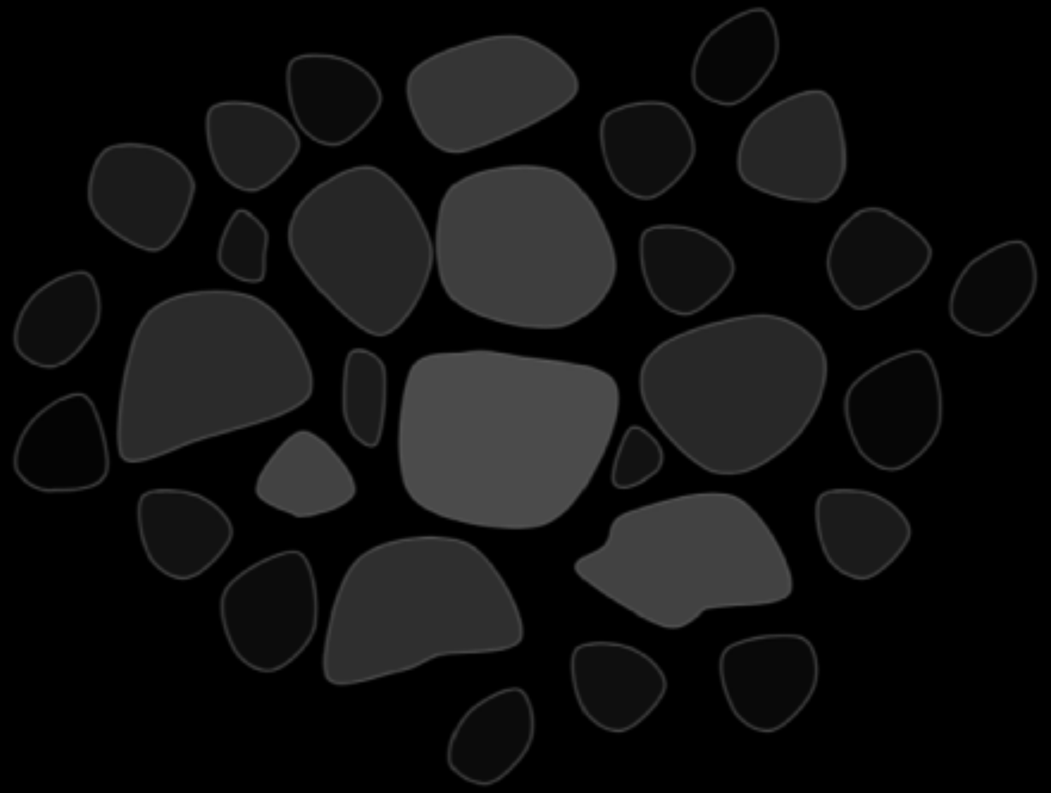

топлинна неустойчивост
разрушаване на молекулярните облаци
формиране на студени HI облаци
неутрален и йонизиран газ
излъчване, загуба на звездна маса
формиране на молекулярни облаци
звездообразуване
гравитационна нестабилност, турбулентност
Звездна еволюция

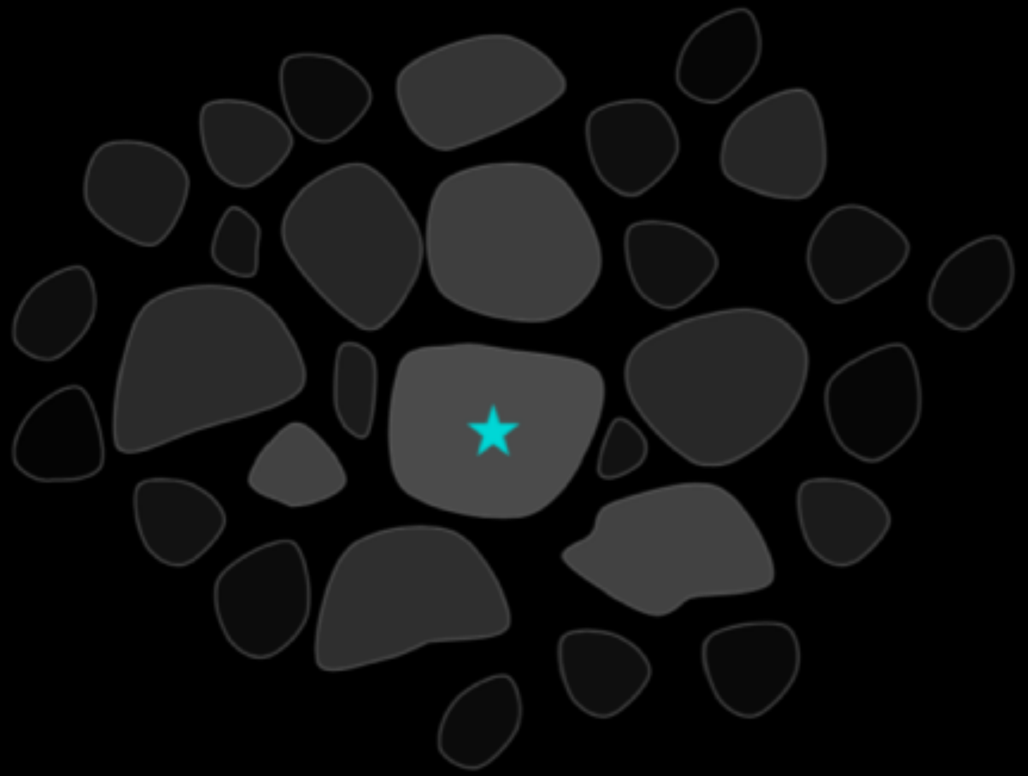


Турбулентността създава **йерархия от локални сгъстявания**

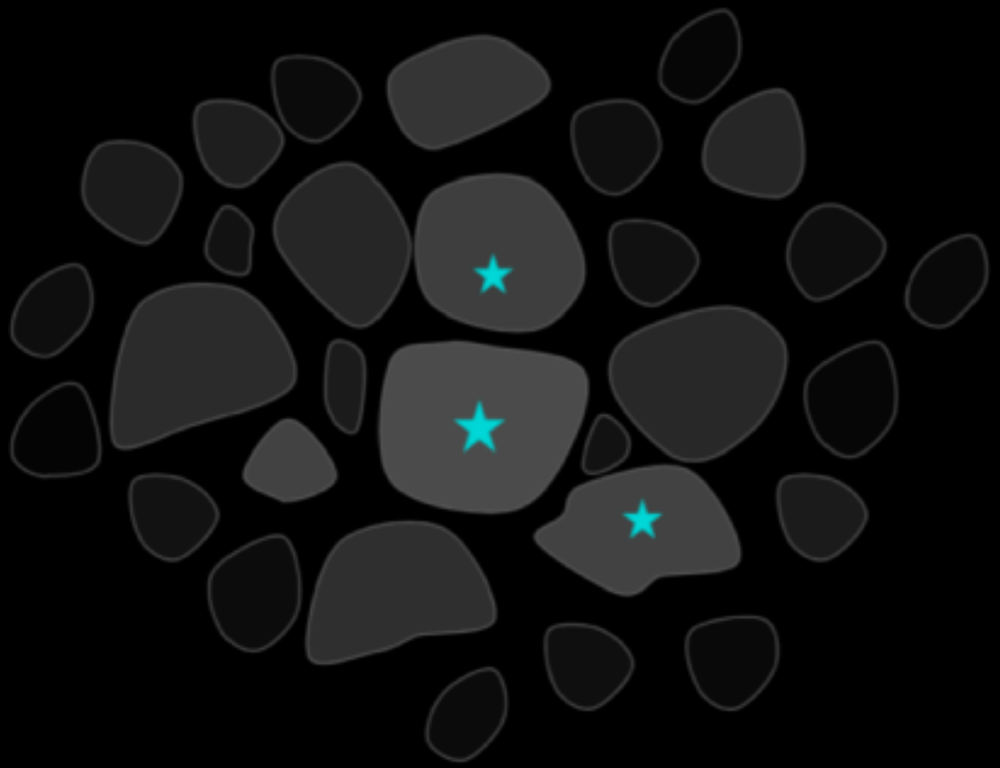


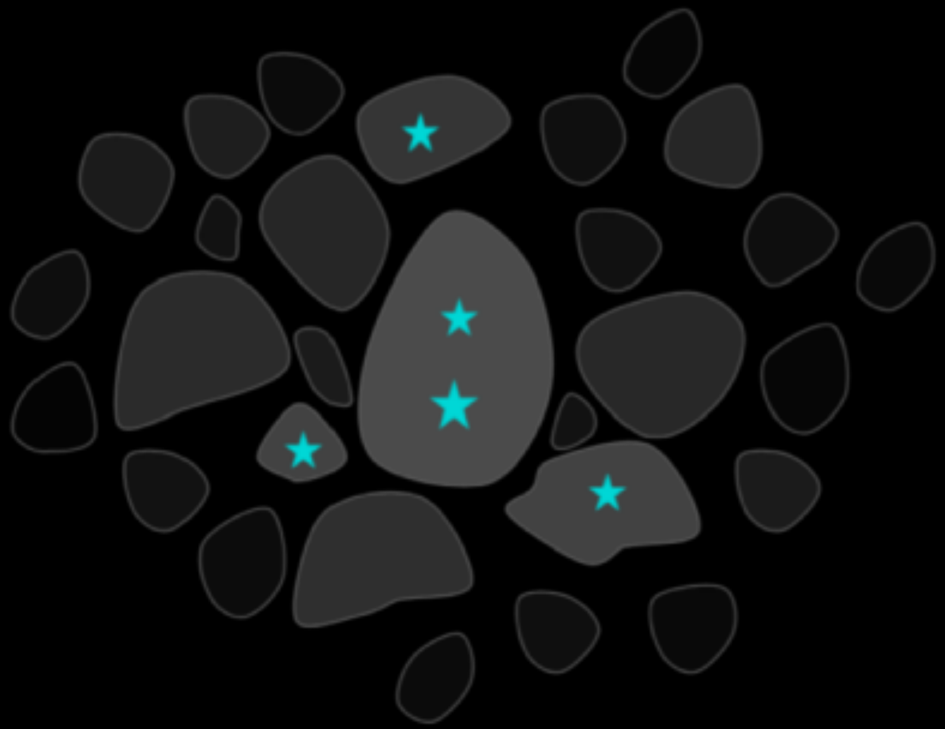
Там където турбулентността отслабва локално, **започват процеси на свиване**



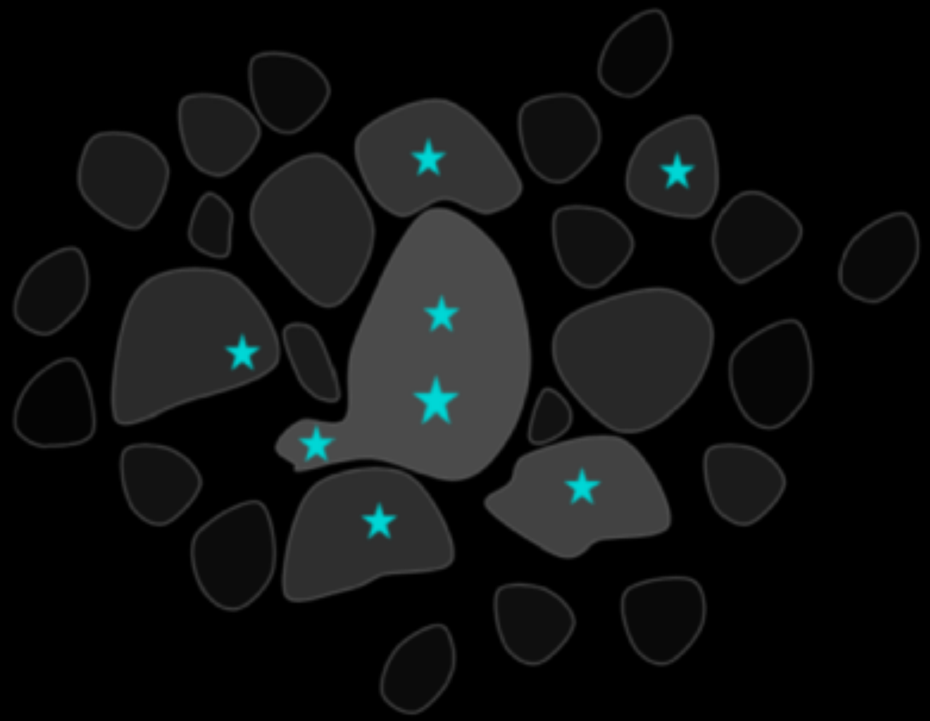


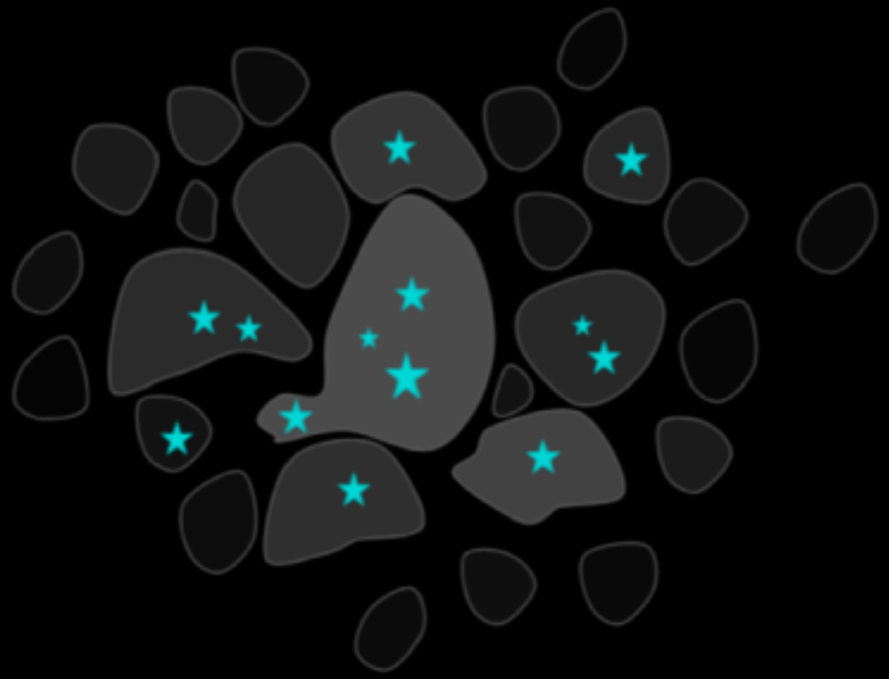
Започват да се образуват първите **протозвездни ядра**

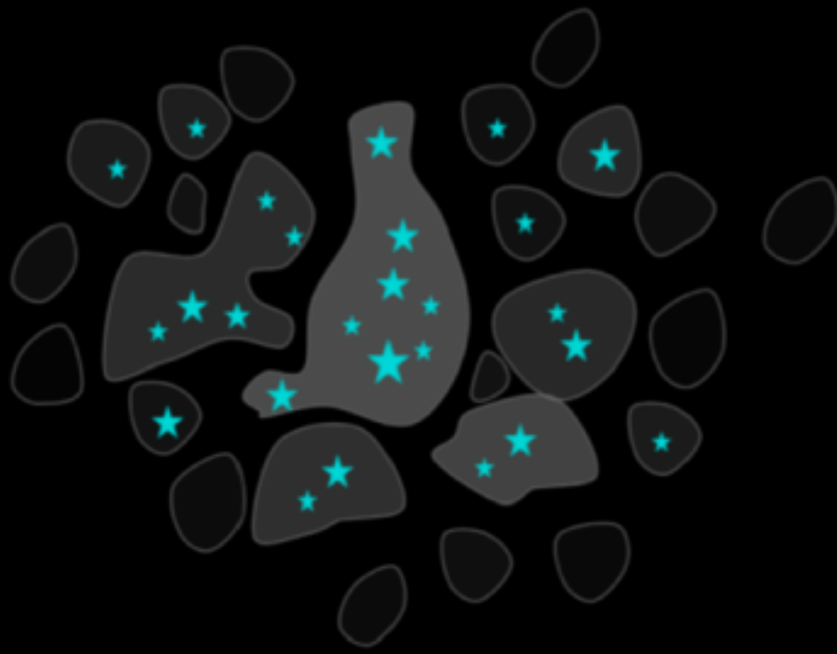




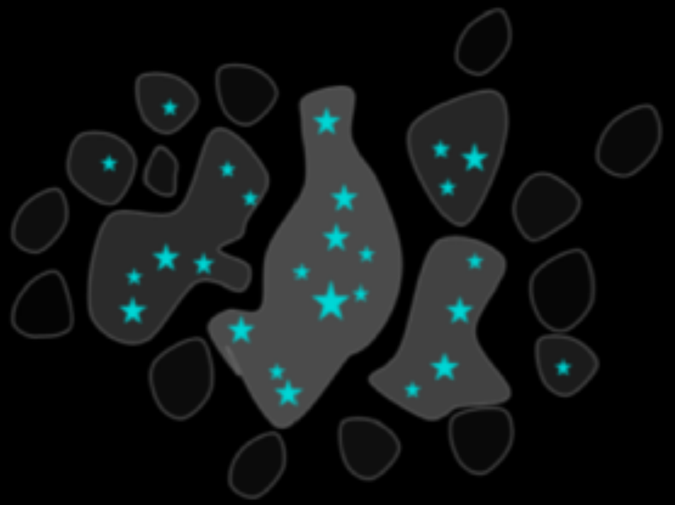
Образуват се **системи от протозвезди**

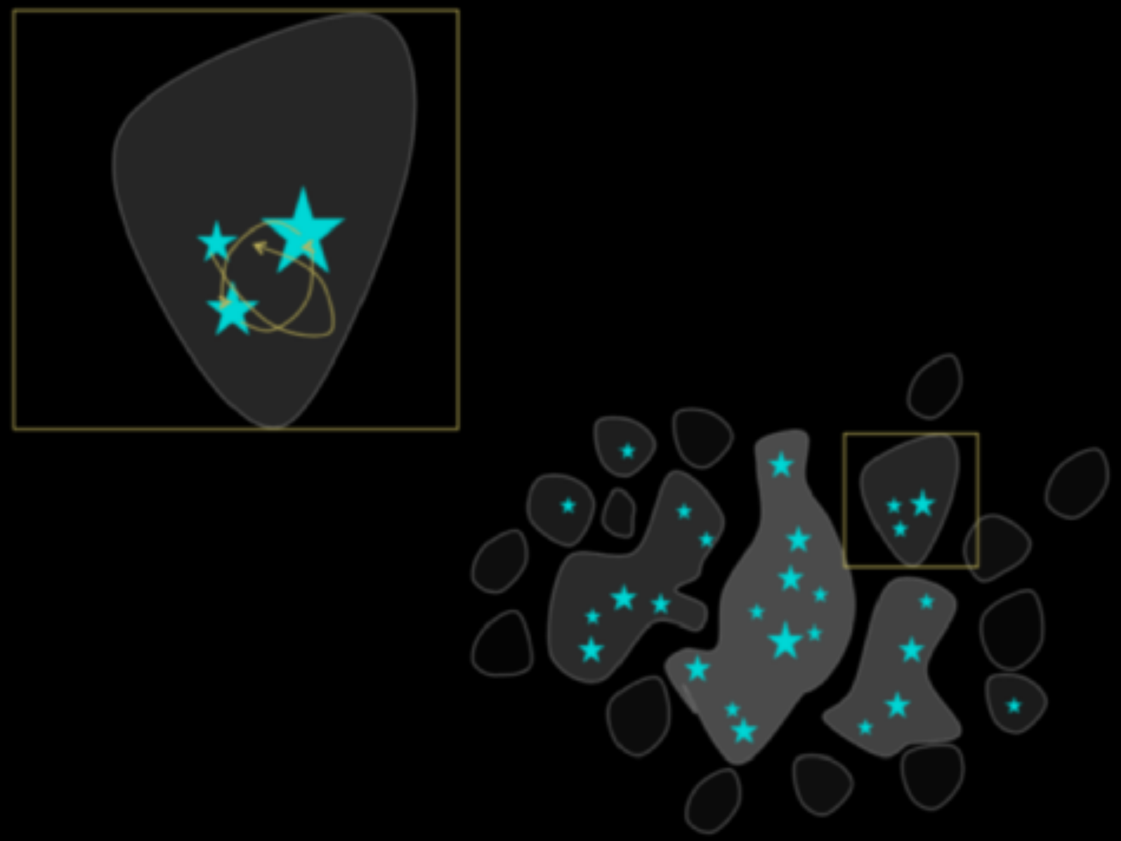




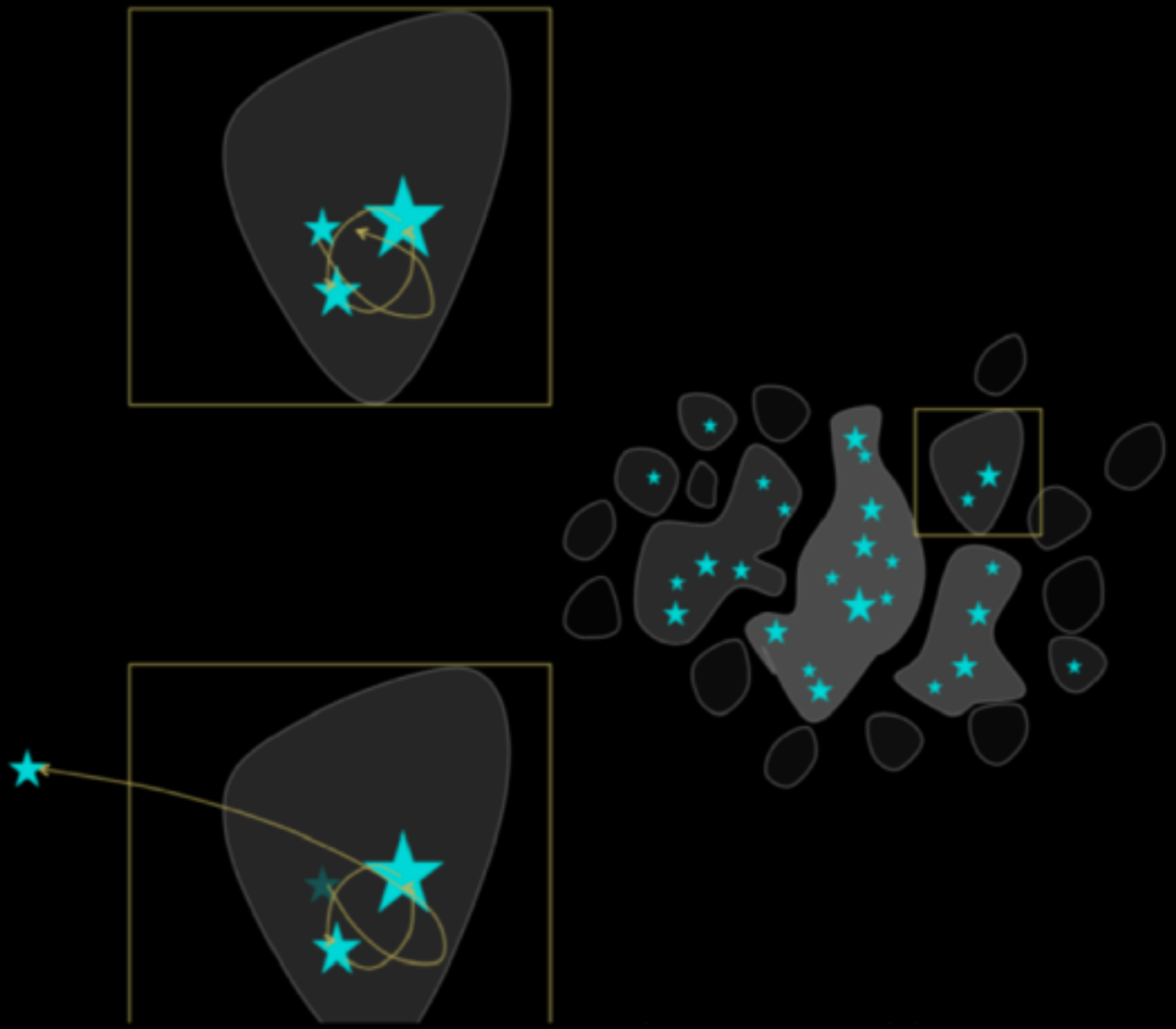


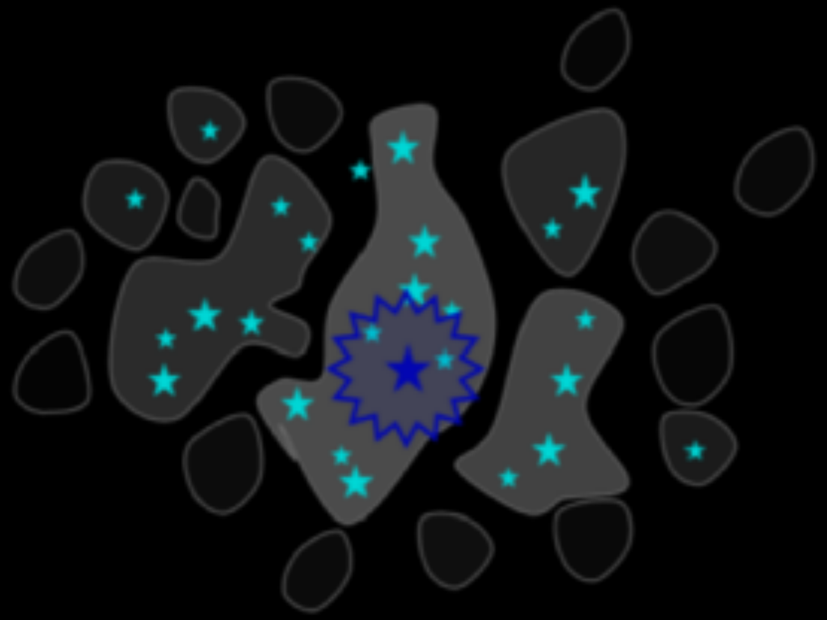
В плътните купове от протозвездни ядра **настъпва конкурентно акумулиране на маса**

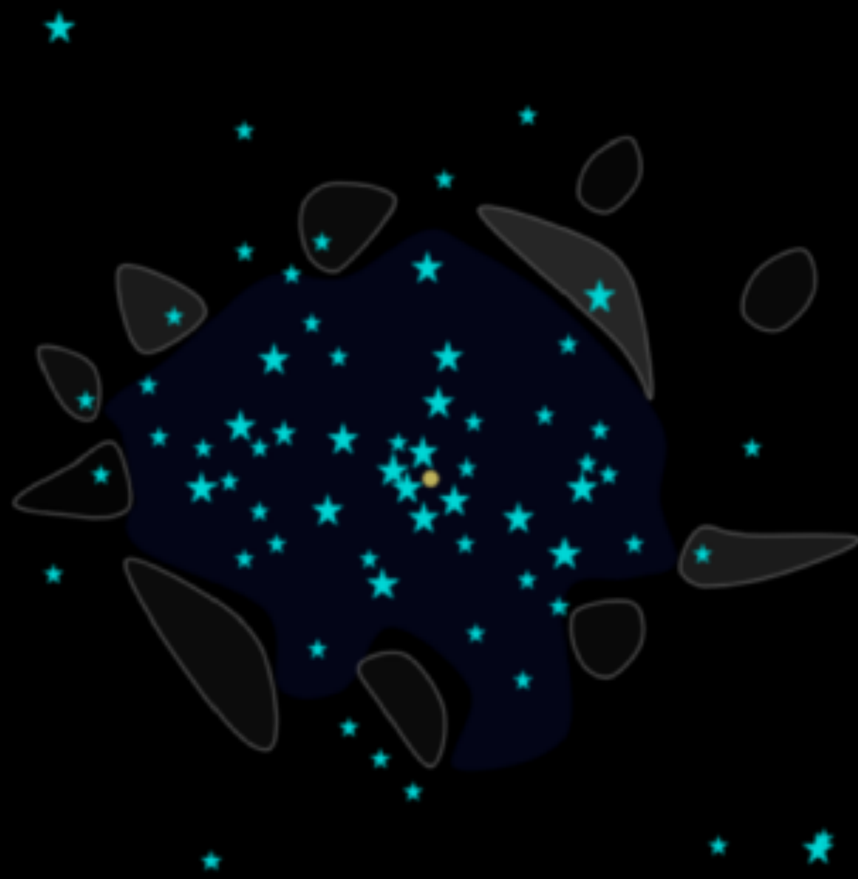




Ефектите на системи с много тела (**N-body) стават значими за акрецията на маса**







Резултат: звезден куп, вероятно с HII област


NGC 602 in the LMC: Hubble Heritage Image



Разнообразие от цветове



Разнообразие от цветове → **Разнообразие от <u>свойства</u>**

ГЛ. АС. Д-Р ОРЛИН СТАНЧЕВ, КАТЕДРА “АСТРОНОМИЯ”, СУ “СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ”

Благодаря!