



INVERNO  
ASTROFÍSICO  
2023

---

População III

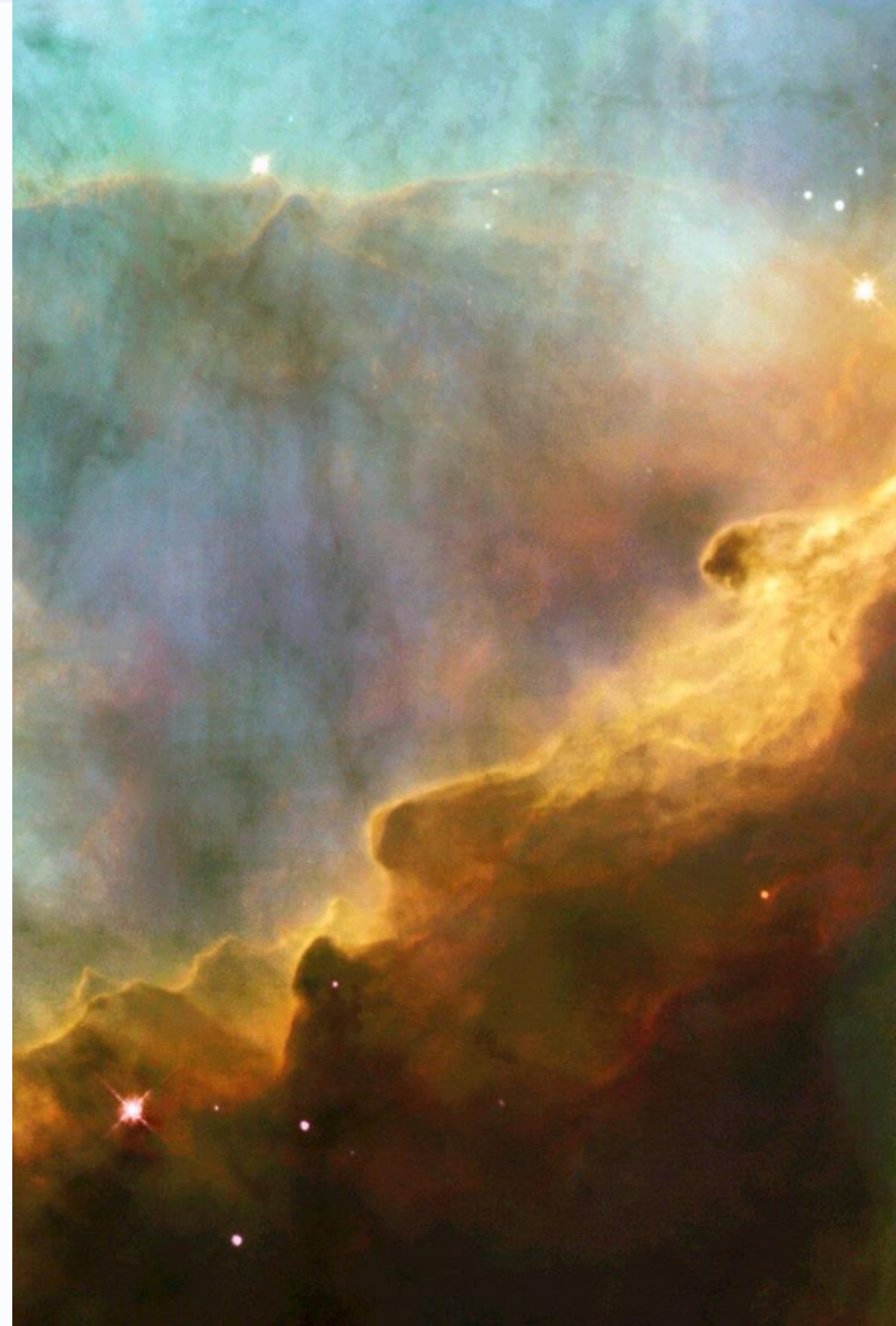
As primeiras estrelas do Universo

Antonio J. Pedra R. Junior – UFES

Júlio C. Fabris

# História do universo

Após o Big Bang, há cerca de 13,8 bilhões de anos, o universo ficou preenchido com uma sopa primordial de partículas, radiação e energia. À medida que o universo se expandiu e esfriou, a temperatura diminuiu o suficiente para permitir que os prótons e nêutrons se combinassem para formar núcleos atômicos de hidrogênio, hélio e traços de lítio. Isso é o que conhecemos como Nucleosíntese primordial.



# Primeiras Estrelas

Após a era das trevas, a matéria começou a se aglomerar a partir de pequenas perturbações gravitacionais. Essas regiões se tornaram cada vez mais densas e quentes, até que as primeiras estrelas finalmente se formaram. Elas eram muito diferentes das estrelas que conhecemos hoje, sendo compostas principalmente de hidrogênio e hélio, sem elementos mais pesados. As primeiras estrelas eram muito massivas e brilhantes, e tiveram um papel importante na evolução do universo.

# Populações Estelares

- População I: As estrelas mais jovens e ricas em metais (metalidade entre 1 e 2%) que se formaram a partir do gás e poeira que foram enriquecidos por gerações anteriores de estrelas. Elas são encontradas principalmente nos braços espirais das galáxias, onde a formação estelar é mais ativa. As estrelas da População I são menos massivas do que as da População II, mas também são mais luminosas.
- População II: As estrelas antigas que se formaram a partir dos restos das primeiras estrelas. Elas são mais pobres em metais (metalidade entre 0,1 e 1%) do que as estrelas da População I, o que significa que têm uma proporção menor de elementos mais pesados em suas atmosferas. As estrelas da População II são geralmente encontradas na região central da galáxia, em aglomerados globulares e em halos galácticos.
- População III: As primeiras estrelas que se formaram após o Big Bang. Elas eram compostas principalmente de hidrogênio e hélio, sem elementos mais pesados. Eram muito massivas e brilhantes, e tiveram um papel importante na evolução do universo. As estrelas da População III não existem mais hoje em dia.

# Características da Pop III

1

Pouca ou nenhuma  
metallicidade

A População III é composta quase exclusivamente por hidrogênio e hélio.

2

Elevada massa

As primeiras estrelas eram muito maiores do que as que temos atualmente, com massas entre 100 e 1000 massas Solares.

3

Curta vida

Devido a sua massa, estas estrelas viveram pouco tempo, poucos milhões de anos queimando o combustível rapidamente e explodindo em supernovas violentas.

# Formação

O processo de formação estelar começa com o colapso gravitacional de uma nuvem molecular de gás e poeira. Se o equilíbrio entre a pressão interna e a gravidade não for mantido, a nuvem pode continuar a colapsar até que a densidade e temperatura sejam altas o suficiente para iniciar a fusão nuclear e formar uma estrela.

O mecanismo de Jeans é um processo que descreve como as flutuações de densidade em uma nuvem molecular podem levar a um colapso gravitacional. Se a massa de uma nuvem molecular for grande o suficiente e a densidade for alta o suficiente, a força gravitacional pode superar a pressão de radiação, levando a um colapso gravitacional.

# Mecanismo de Jeans

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P - \vec{\nabla} \phi$$

Equação de Euler

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

Equação da continuidade

# Mecanismo de Jeans

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho$$

Equação de Poisson

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{v_s^2}{\rho} \vec{\nabla} \delta \rho - \vec{\nabla} \phi$$

Considerando a pressão função apenas da densidade.



$$\begin{cases} \rho = \rho_0 + \rho_1 \\ \phi = \phi_0 + \phi_1 \\ \vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{v}_1 \end{cases}$$

Fazemos pequenas perturbações lineares e infinitesimais.

$$\begin{cases} P_0 = Cst \\ v_0 = 0 \\ \rho_0 = Cst \end{cases}$$

Adicionamos as condições iniciais para a configuração de equilíbrio.

O lado esquerdo da equação de Euler se torna:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\vec{v}_0 + \vec{v}_1) + ((\vec{v}_0 + \vec{v}_1) \cdot \vec{\nabla})(\vec{v}_0 + \vec{v}_1)$$

O lado direito se torna:

$$= -\frac{v_s^2}{\rho_0 + \rho_1} \vec{\nabla}(\rho_0 + \rho_1) - \vec{\nabla}(\phi_0 + \phi_1)$$

Expantimos o seguinte termo em séries de Taylor:

$$\frac{1}{\rho_0 + \rho_1} = \frac{1}{\rho_0} + \frac{1}{(\rho_0 + \rho_1)^2}$$

Calculamos o Potencial de Equilíbrio com:

$$\nabla^2 \phi_0 = 4\pi G \rho_0$$

Obtemos então:

$$\frac{1}{\rho_0 + \rho_1} \approx \frac{1}{\rho_0}$$

O lado direito se torna:

$$-\frac{v_s^2}{\rho_0} \vec{\nabla} \rho_1 - \vec{\nabla} \phi_1$$

A equação de Euler se torna:

$$\frac{\partial \vec{v}_1}{\partial t} = -\frac{v_s^2}{\rho_0} \vec{\nabla} \rho_1 - \vec{\nabla} \phi_1$$

A equação da continuidade se torna:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} = -\rho_0 \vec{\nabla} \cdot \vec{v}_1$$

Da mesma forma:

$$\nabla^2 \phi_1 = 4\pi G \rho_1$$

Com isso podemos obter a equação de onda:

$$\frac{\partial^2 \rho_1}{\partial t^2} = v_s^2 \vec{\nabla}^2 \rho_1 + 4\pi G \rho_1 \rho_0$$

Tomamos a transformada de Fourier com relação a t de ambos os lados:

$$\int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\partial^2 \rho_1}{\partial t^2} e^{-i\omega t} dt d\vec{r} = \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty (v_s^2 \vec{\nabla}^2 \rho_1) e^{-i\omega t} dt d\vec{r} + \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty (4\pi G \rho_1 \rho_0) e^{-i\omega t} dt d\vec{r}$$

Considerando que as perturbações se propagam como ondas planas, podemos obter como solução a relação de dispersão:

$$\omega^2 = v_s^2 k^2 - 4\pi G \rho_0$$

Procuramos soluções instáveis que evoluam exponencialmente com o tempo e provocam o colapso da nuvem.

$$k_j^2 = \frac{4\pi G \rho_0}{v_s^2}$$

# Próximos passos

Agora levaremos em consideração a expansão do universo da seguinte forma:

$$\rho = \rho_0 \left[ \frac{R_0}{R(t)} \right]^3$$

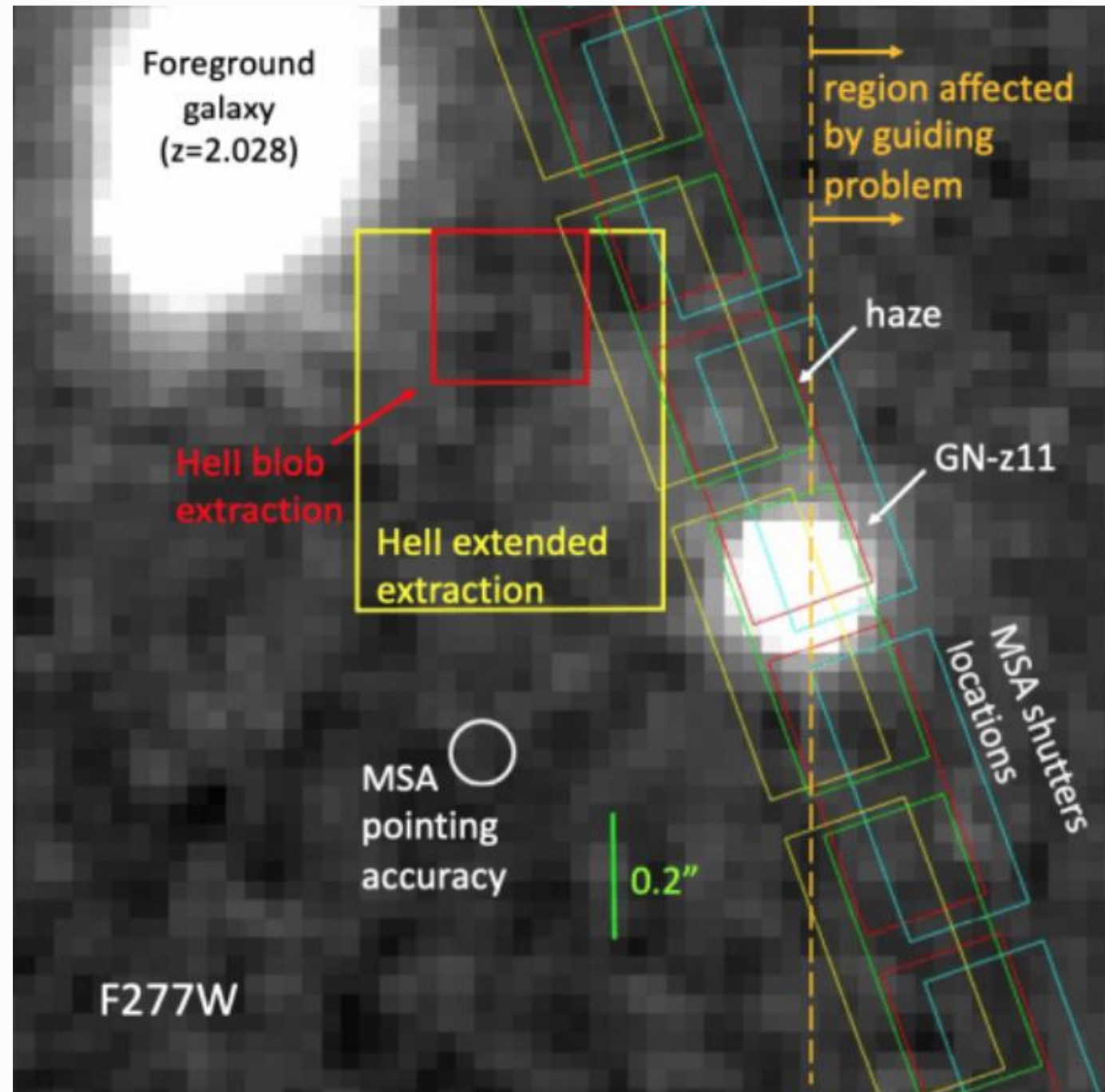
$$\vec{v} = \vec{r} \left[ \frac{\dot{R}(t)}{R(t)} \right]$$

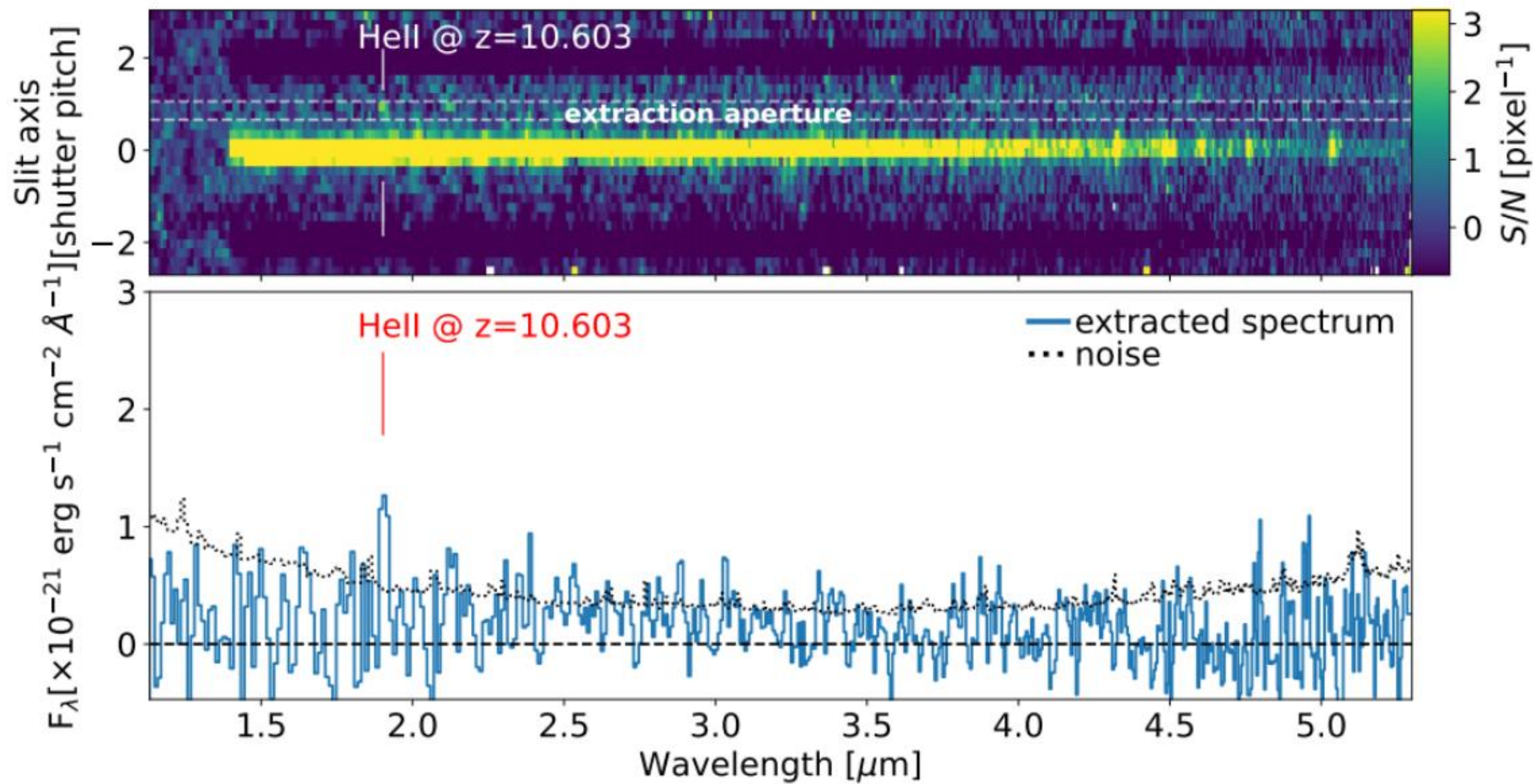
$$\vec{g} = -\vec{r} \left[ \frac{4\pi G \rho}{3} \right]$$

# Observações das Pop III?

## **JADES. Possible Population III signatures at $z=10.6$ in the halo of GN-z11**

Roberto Maiolino<sup>1,2,3,★</sup>, Hannah Übler<sup>1,2</sup>, Michele Perna<sup>4</sup>, Jan Scholtz<sup>1,2</sup>, Francesco D'Eugenio<sup>1,2</sup>, Callum Witten<sup>5,1</sup>, Nicolas Laporte<sup>1,2</sup>, Joris Witstok<sup>1,2</sup>, Stefano Carniani<sup>6</sup>, Sandro Tacchella<sup>1,2</sup>, William M. Baker<sup>1,2</sup>, Santiago Arribas<sup>4</sup>, Kimihiko Nakajima<sup>7</sup>, Daniel J. Eisenstein<sup>8</sup>, Andrew J. Bunker<sup>9</sup>, Stéphane Charlot<sup>10</sup>, Giovanni Cresci<sup>11</sup>, Mirko Curti<sup>12</sup>, Emma Curtis-Lake<sup>13</sup>, Anna de Graaff<sup>14</sup>, Eiichi Egami<sup>15</sup>, Zhiyuan Ji<sup>15</sup>, Benjamin D. Johnson<sup>8</sup>, Nimisha Kumari<sup>16</sup>, Tobias J. Looser<sup>1,2</sup>, Michael Maseda<sup>17</sup>, Brant Robertson<sup>18</sup>, Bruno Rodríguez Del Pino<sup>4</sup>, Lester Sandles<sup>1,2</sup>, Charlotte Simmonds<sup>1,2</sup>, Renske Smit<sup>19</sup>, Fengwu Sun<sup>15</sup>, Giacomo Venturi<sup>6</sup>, Christina C. Williams<sup>20</sup>, and Christopher N. A. Willmer<sup>15</sup>







# Referências:

- S. Weinberg, Gravitation and Cosmology (Wiley, 1972);
- J. César Fabris, Gravitação (PPGFis, 2021);
- R. Maiolino, Possible Population III signatures at  $z=10.6$  in the halo of GN-z11 (JADES, 2023);
- Landau and Lifshitz, Fluid Mechanics: : Course of Theoretical Physics, Volume 6 (1987);
- Formação Estelar (ufrgs.br) - <http://astro.if.ufrgs.br/evol/node55.htm>

Obrigado a todos!

