

# ESCOLA DE INVERNO EM ASTROFÍSICA 2025



Observatório  
Nacional

MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÃO

GOVERNO FEDERAL  
**BRASIL**  
UNIÃO E RECONSTRUÇÃO

**Sondando o mistério da matéria  
escura através de raios gama: o  
estado da arte**

**Clarissa Siqueira**

**Julho, 2025**

# Sumário

## 1 Motivação

2 Evidências: Quais informações podemos tirar delas?

3 Possíveis Explicações e Candidatos

4 Como produzir?

- A abundância de Matéria Escura

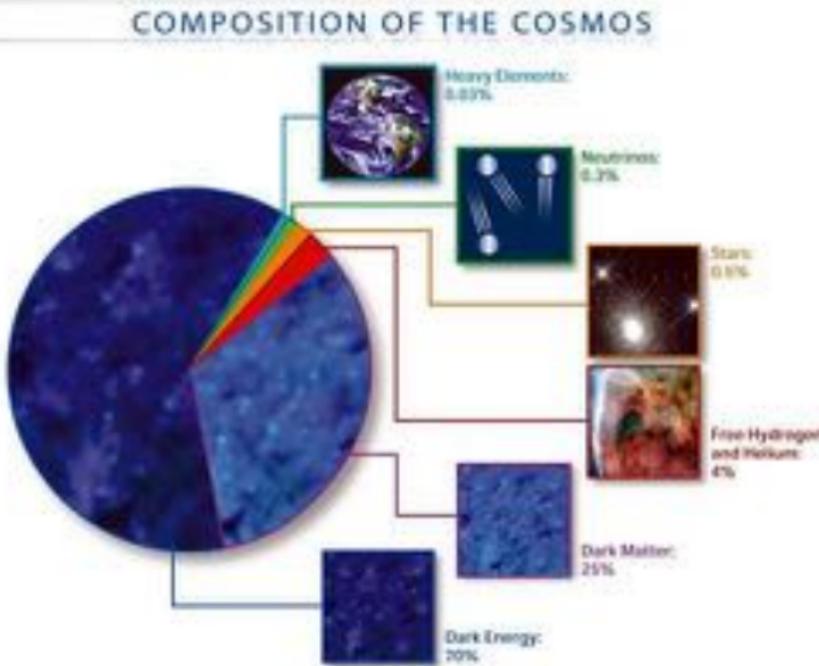
5 Como detectar?

- Aceleradores
- Detecção Direta
- Detecção Indireta

6 Aplicações

- Modelo de dubbleto inerte
- Modelos *Secluded*

# Composição do Universo



# Sumário

## 1 Motivação

## 2 Evidências: Quais informações podemos tirar delas?

## 3 Possíveis Explicações e Candidatos

## 4 Como produzir?

- A abundância de Matéria Escura

## 5 Como detectar?

- Aceleradores
- Detecção Direta
- Detecção Indireta

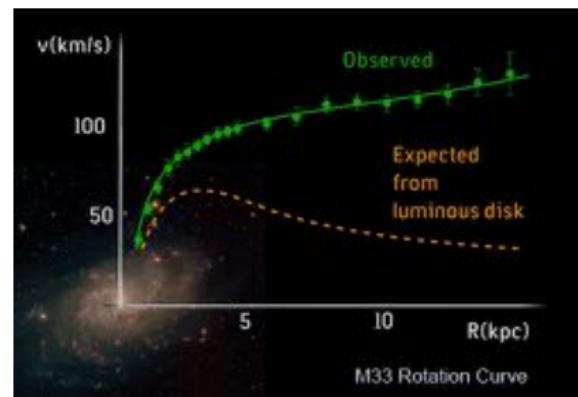
## 6 Aplicações

- Modelo de dubbleto inerte
- Modelos *Secluded*

# Rubin e as Curvas de rotação

- Gravitação Newtoniana [2]:

$$F_c = F_G \Rightarrow \frac{mv_c^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$$



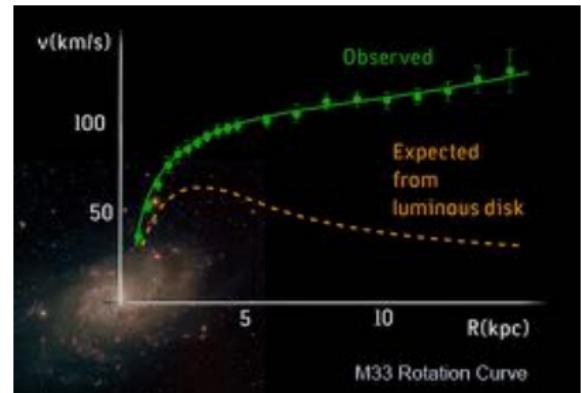
# Rubin e as Curvas de rotação

- Gravitação Newtoniana [2]:

$$F_c = F_G \Rightarrow \frac{mv_c^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$$

- Para  $r > R_{disco}$ ,  $M$  é constante:

$$v_c(r) = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$



# Rubin e as Curvas de rotação

- Gravitação Newtoniana [2]:

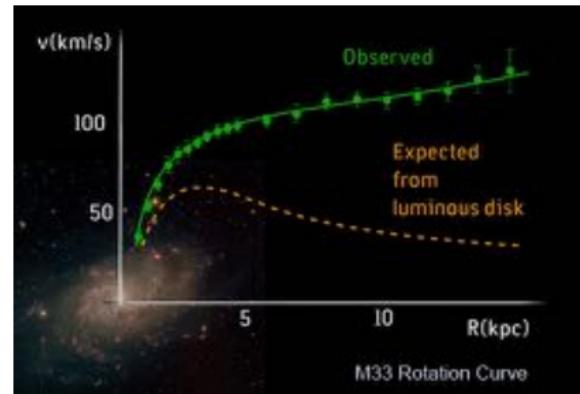
$$F_c = F_G \Rightarrow \frac{mv_c^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$$

- Para  $r > R_{disco}$ ,  $M$  é constante:

$$v_c(r) = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

- O que observamos?

$$v_c(r) = \text{cte} \Rightarrow M(r) \propto r$$



# Rubin e as Curvas de rotação

- Gravitação Newtoniana [2]:

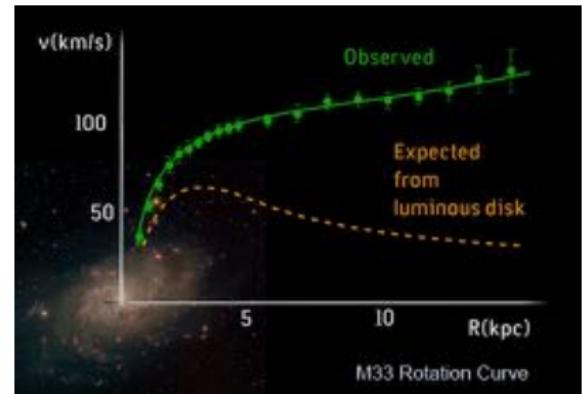
$$F_c = F_G \Rightarrow \frac{mv_c^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$$

- Para  $r > R_{disco}$ ,  $M$  é constante:

$$v_c(r) = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

- O que observamos?

$$v_c(r) = \text{cte} \Rightarrow M(r) \propto r$$



- Densidade do halo esférico de ME:

$$\rho_{DM}(r) = \frac{M(r)}{V} \propto \frac{1}{r^2}$$

# Zwicky e os Aglomerados de galáxias

## Teorema do Virial [1]

$$2T + U = 0$$

# Zwicky e os Aglomerados de galáxias

## Teorema do Virial [1]

$$2T + U = 0$$

### Aglomerados de Galáxias

$$M_{tot} = \frac{5R_{tot}\langle v \rangle^2}{3G}$$

Aglomerado Coma  $\rightarrow$  400 vezes mais massivo que o observado!!



# Estimando alguns parâmetros

## Perfil de halo NFW

$$\rho_{DM}(r) = \frac{\rho_s}{r/r_s(1+r/r_s)^2}$$

com  $r_s = 20$  kpc e  $\rho_s = 0.184$  GeV/cm<sup>3</sup>.

# Estimando alguns parâmetros

## Perfil de halo NFW

$$\rho_{DM}(r) = \frac{\rho_s}{r/r_s(1+r/r_s)^2}$$

com  $r_s = 20$  kpc e  $\rho_s = 0.184$  GeV/cm<sup>3</sup>.

Podemos estimar o raio deste halo, com  $M_{halo} = 10^{12}M_\odot$  e  $\rho_0 = 0.4$  GeV/cm<sup>3</sup>:

$$M_{halo} \sim 4\pi \int_0^{R_{halo}} dr \ r^2 \rho_{DM}(r) \rightarrow R_{halo} \sim 100 \text{ kpc} \quad (1)$$

Para galáxias espirais:  $R_{disco} \sim 10$  kpc.

Além disso, do teorema do Virial podemos obter

$$\langle v \rangle \sim \sqrt{\frac{GM_{halo}}{R_{halo}}} \sim 200 \text{ km/s} \quad (2)$$

# Colisão entre Aglomerados de Galáxias



Observatório de Raio-X Chandra, 2004.

# Colisão entre Aglomerados de Galáxias

Galáxias  $\sim 1 - 2\%$ ; Gás  $\sim 5 - 15\%$

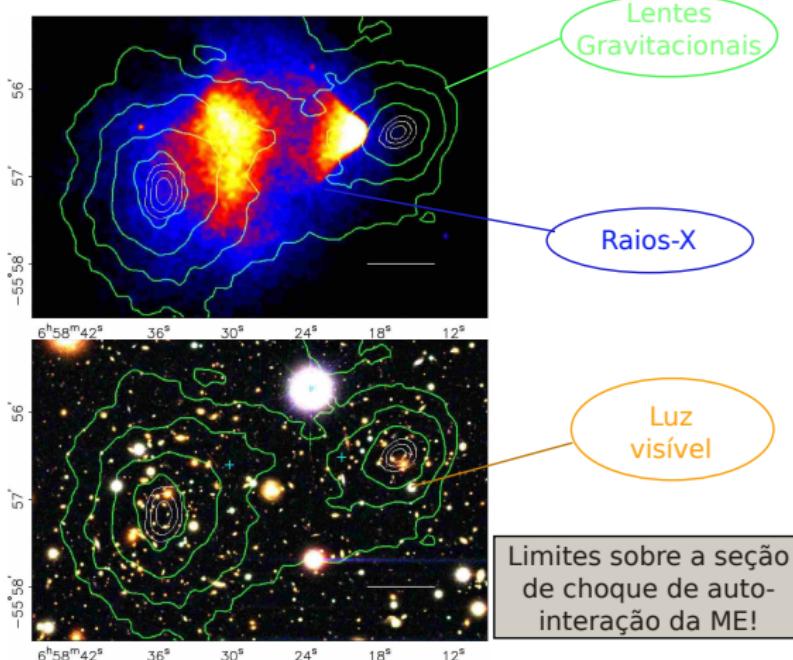
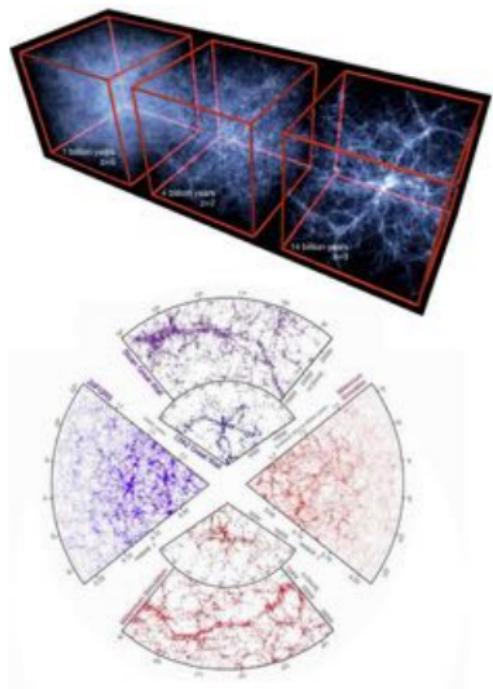


Figure: <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0608407.pdf>

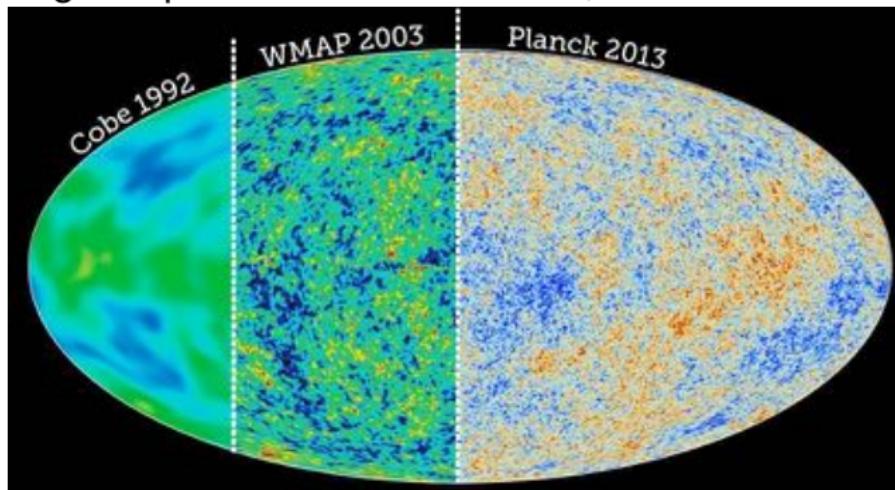
# Formação de Estruturas

- Estruturas foram formadas a partir de pequenas perturbações iniciais observadas através da CMB;
- Comparação entre simulações e observações são compatíveis;
- O universo é formado de escalas menores para escalas maiores;
- A presença da ME é essencial para a evolução das perturbações iniciais e o desenvolvimento das estruturas.

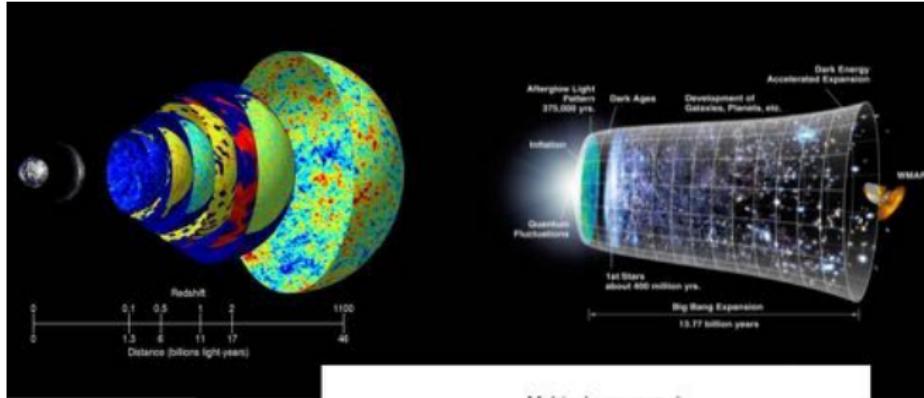


# Radiação Cósmica de Fundo

- Radiação que nos traz informação de quando o Universo tinha apenas 380 mil anos (hoje 13.4 bilhões de anos);
- Predita por Gamov nos anos 50;
- Observada pela primeira vez por Penzias e Wilson em 1964, acidentalmente;
- Primeira medida oficial pelo satélite COBE em 1992, em seguida pelo WMAP e o Planck;

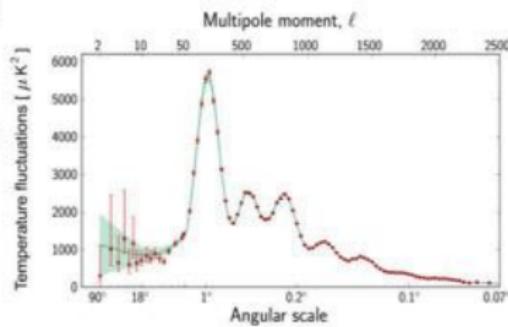


# Radiação Cósmica de Fundo



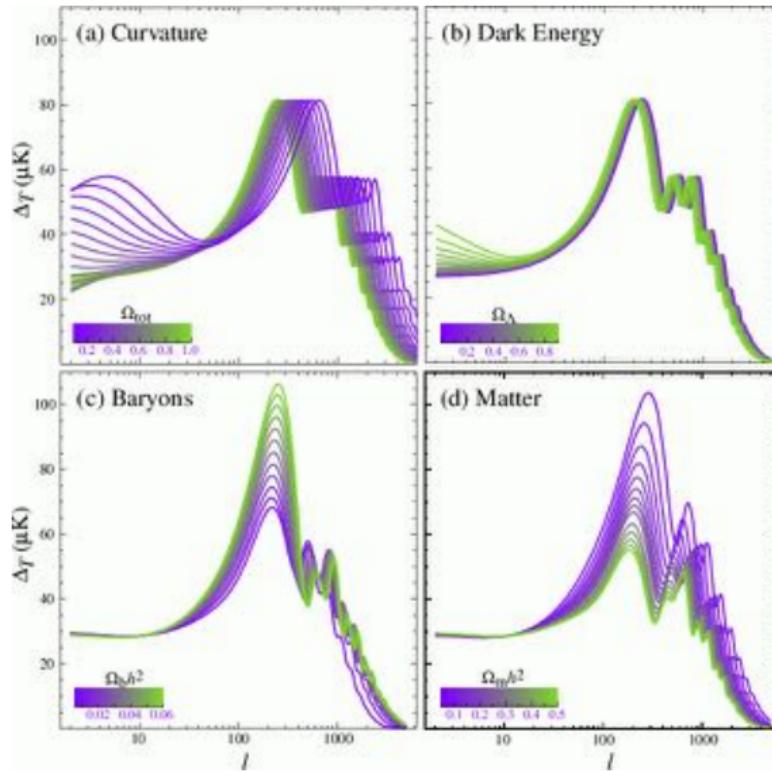
$$\Omega_m = \Omega_b + \Omega_{ME} \simeq 0.30$$
$$\text{BBN} \rightarrow \Omega_b \simeq 0.04$$

$$\frac{\delta T}{T} \sim 10^{-5}$$



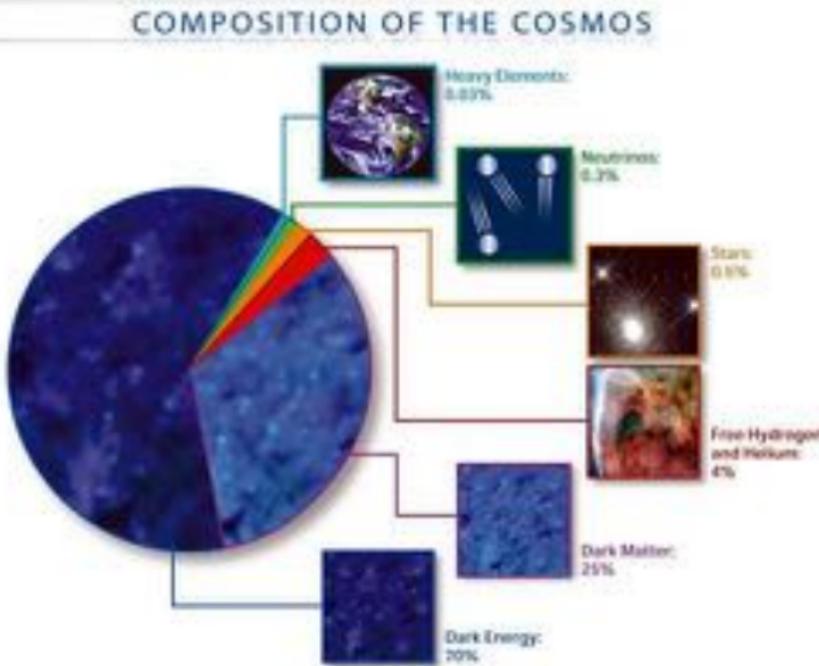
6 Parâmetros Cosmológicos:  $\Lambda$ CDM ( $\Lambda$  Cold Dark Matter) Matéria Escura é um ingrediente fundamental!!

# Radiação Cósmica de Fundo



[https://wmap.gsfc.nasa.gov/resources/camb\\_tool/index.html](https://wmap.gsfc.nasa.gov/resources/camb_tool/index.html)

# Composição do Universo



# Sumário

- 1 Motivação**
- 2 Evidências: Quais informações podemos tirar delas?**
- 3 Possíveis Explicações e Candidatos**
- 4 Como produzir?**
  - A abundância de Matéria Escura
- 5 Como detectar?**
  - Aceleradores
  - Detecção Direta
  - Detecção Indireta
- 6 Aplicações**
  - Modelo de dubbleto inerte
  - Modelos *Secluded*

# MOND

- Modificações na teoria da gravitação (MOND [4] / TeVeS [6]);
- Explicam curvas de rotação;
- Não explicam: colisões de aglomerados, formação de Estruturas, CMB (oscilações bariônicas acústicas) [5];

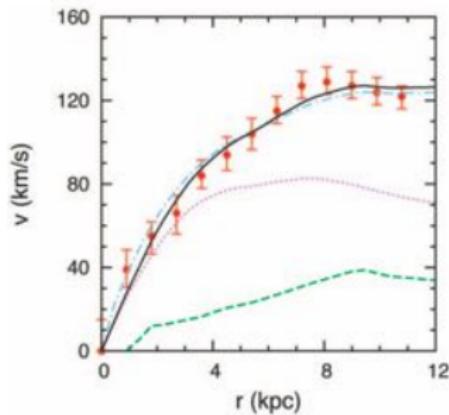


Figure: [4]

# MACHOs

- Objetos massivos de halo compacto (anãs marrons, estrelas de neutrons, buracos negros);
- Compostos de bárions e emitem pouquíssima radiação;
- Podem ser observados por meio de microlensing;
- Medidas apontam uma abundância muito menor do que a necessária:  $\Omega_{DM} < 10\%$ .

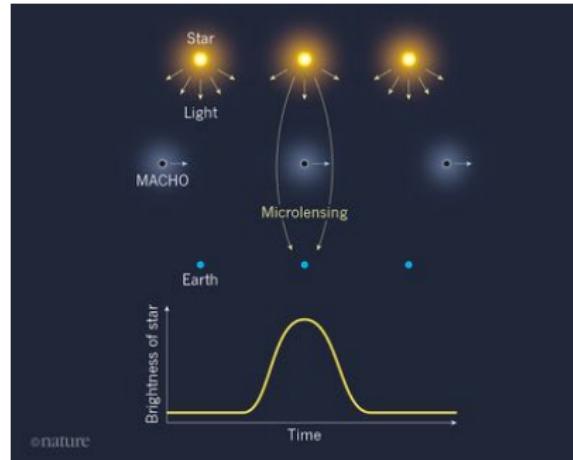


Figure: Nature article. [7]

# PBHs

- Buracos Negros primoriais;
- Formados no início do Universo;
- Ganharam mais atenção após a observação de ondas gravitacionais pelo LIGO.

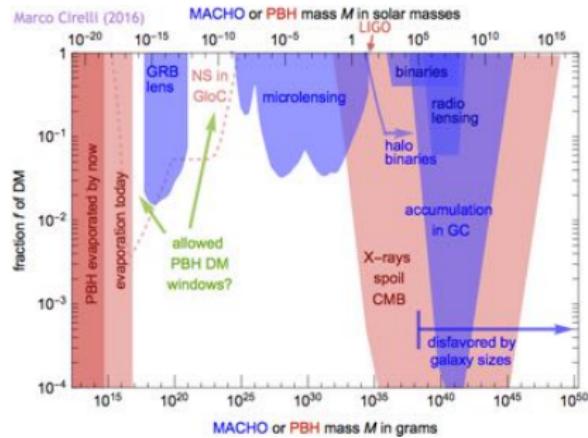


Figure: Imagem tirada de Resonaances

<http://resonaances.blogspot.com/2016/06/black-hole-dark-matter.html>.

# Partículas - Principais características

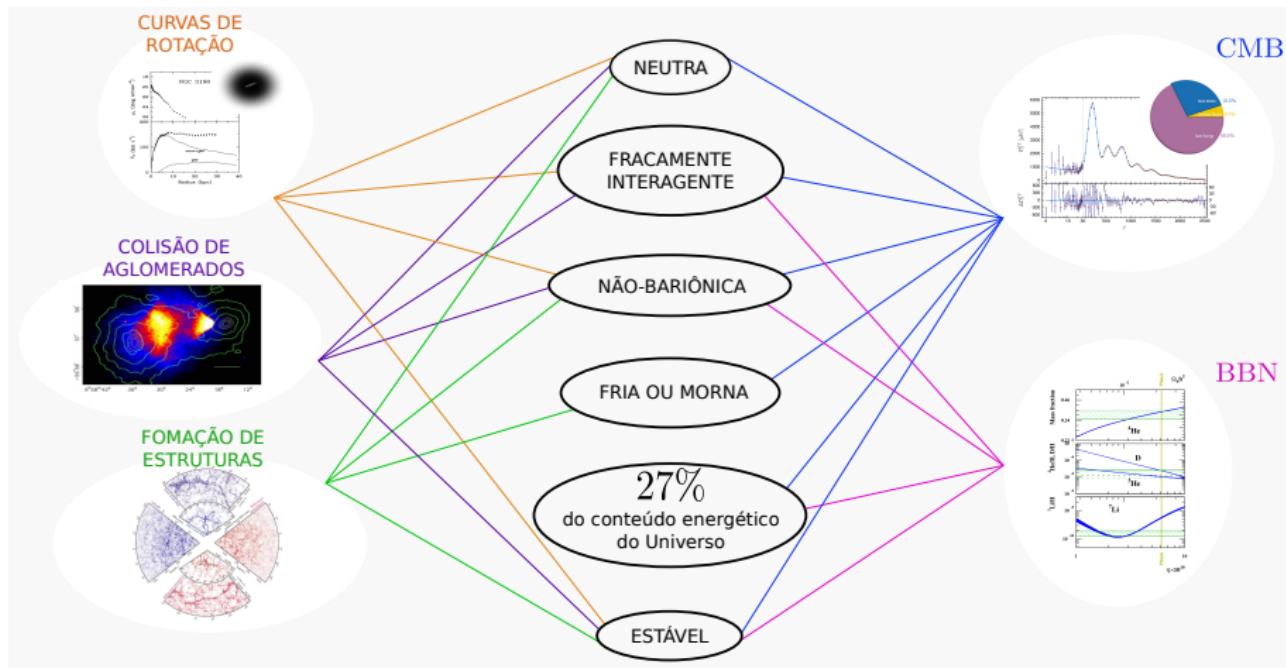
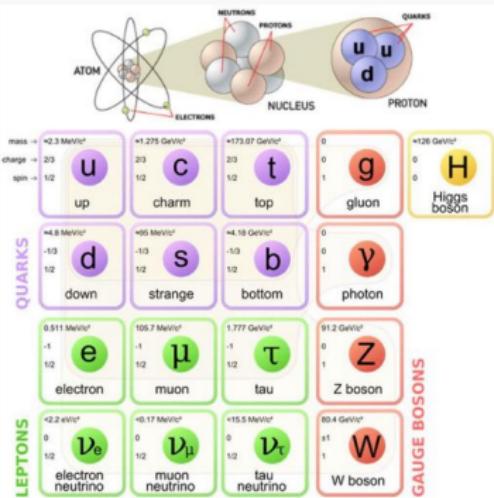


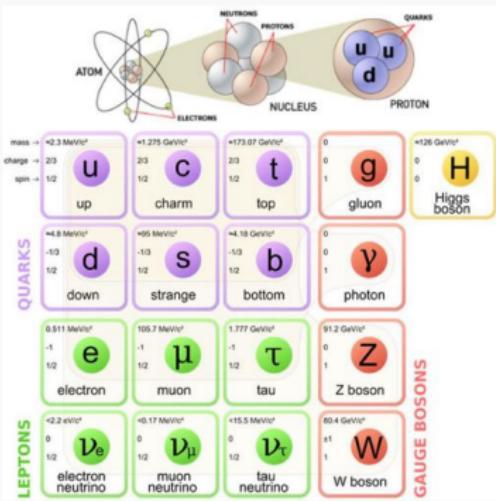
Figure: Cedida por Maíra Dutra (versão modificada) [8]

# O Modelo Padrão da física de partículas



- Massa/oscilação para Neutrinos;
- Problema de CP forte;
- Assimetria matéria/anti-matéria;
- Problema da hierarquia;
- $g - 2$  do muon (?);
- Candidato à Matéria Escura!

# O Modelo Padrão da física de partículas



- Massa/oscilação para Neutrinos;
- Problema de CP forte;
- Assimetria matéria/anti-matéria;
- Problema da hierarquia;
- $g - 2$  do múon (?);
- Candidato à Matéria Escura!

- MP não possui candidato viável à ME  $\rightarrow$  FÍSICA NOVA!!!
- Principais candidatos: WIMPs  $\rightarrow$  surgem em diversas extensões bem-motivadas do modelo padrão;
- Possuem massa na escala de GeV até TeV (1 eV  $\approx 1.6 \times 10^{-19}$  J)

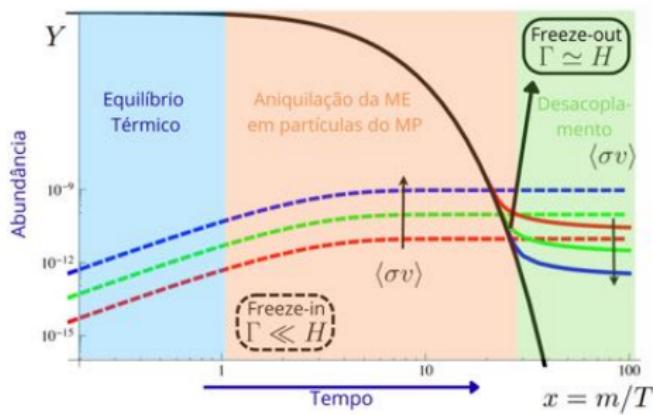
# Sumário

- 1 Motivação**
- 2 Evidências: Quais informações podemos tirar delas?**
- 3 Possíveis Explicações e Candidatos**
- 4 Como produzir?**
  - A abundância de Matéria Escura
- 5 Como detectar?**
  - Aceleradores
  - Detecção Direta
  - Detecção Indireta
- 6 Aplicações**
  - Modelo de dubbleto inerte
  - Modelos *Secluded*

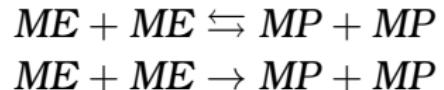
# Como produzir?

## Equação de Boltzmann

$$\dot{n}_i + 3Hn_i = R(T)$$



Freeze-out:



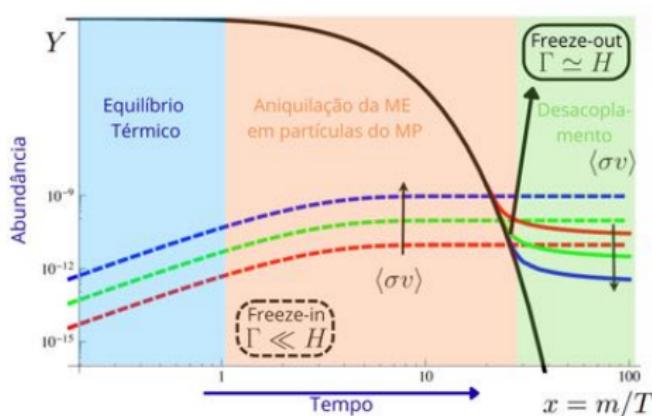
$$\frac{dY}{dx} = -\frac{xs\langle\sigma v\rangle}{H} \left( Y_\chi^2 - Y_{\chi,eq}^2 \right)$$

$$\Omega_{ME} h^2 = 0.1200 \pm 0.0012 \quad (\text{Planck})$$

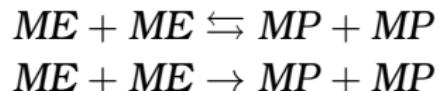
# Como produzir?

## Equação de Boltzmann

$$\dot{n}_i + 3Hn_i = R(T)$$



Freeze-out:



$$\frac{dY}{dx} = -\frac{xs\langle\sigma v\rangle}{H} \left( Y_\chi^2 - Y_{\chi,eq}^2 \right)$$

$$\Omega_{ME} h^2 = 0.1200 \pm 0.0012 \quad (\text{Planck})$$

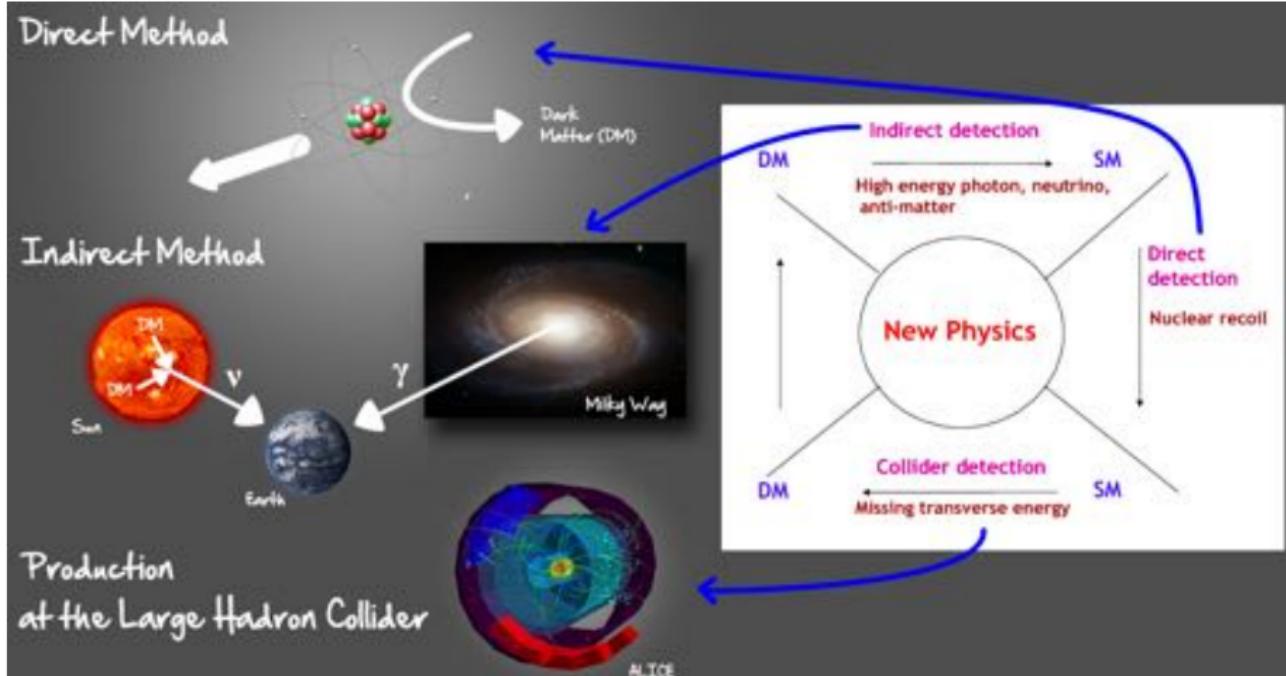
Seção de choque térmica detectável pelos experimentos atuais

$$\langle \sigma v \rangle \simeq 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$$

# Sumário

- 1 Motivação**
- 2 Evidências: Quais informações podemos tirar delas?**
- 3 Possíveis Explicações e Candidatos**
- 4 Como produzir?**
  - A abundância de Matéria Escura
- 5 Como detectar?**
  - Aceleradores
  - Detecção Direta
  - Detecção Indireta
- 6 Aplicações**
  - Modelo de dubbleto inerte
  - Modelos *Secluded*

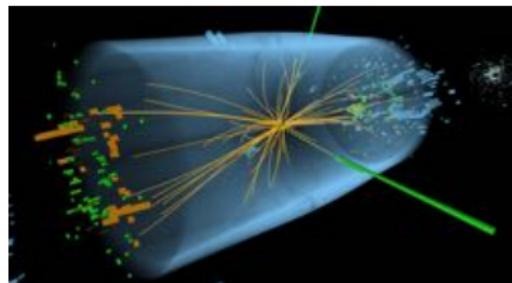
# Métodos da detecção



# Busca por ME em Aceleradores



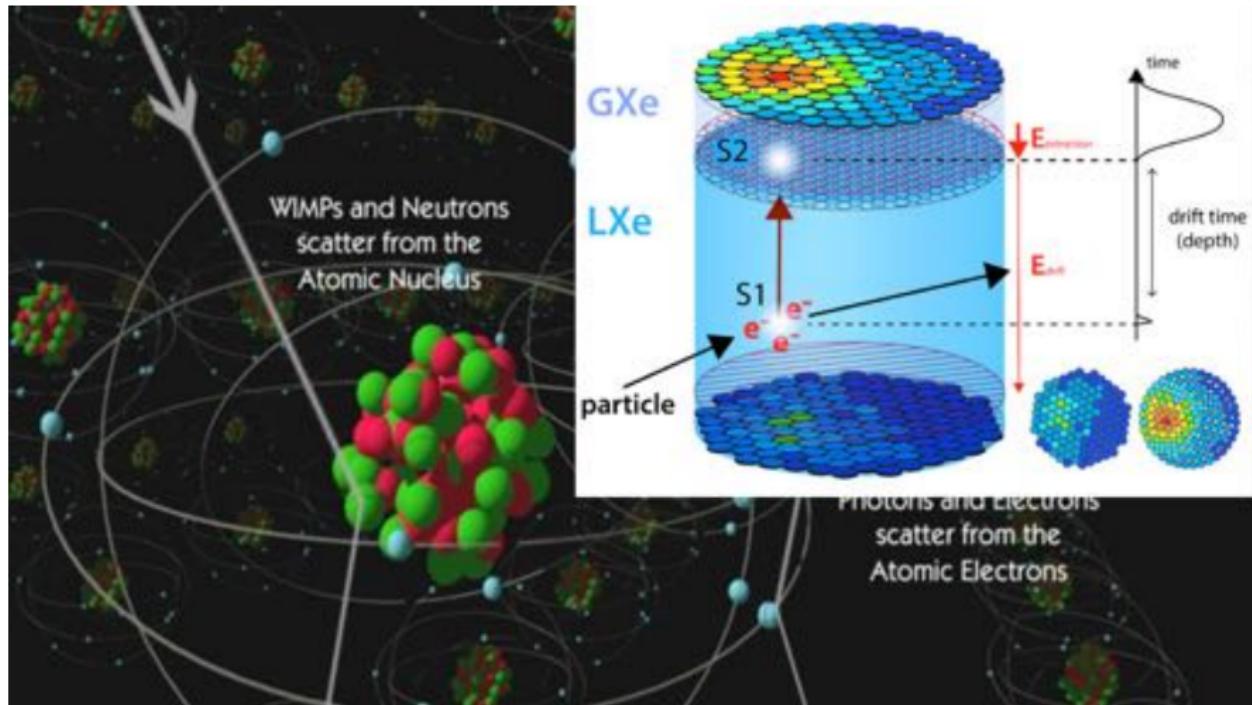
- Grande Colisor de H  drons (LHC) colide prótons;
- Circunferência de 27 km;
- Localizado entre a França e a Suiça;
- ME (fracamente interagente) não deixa rastros no detector.



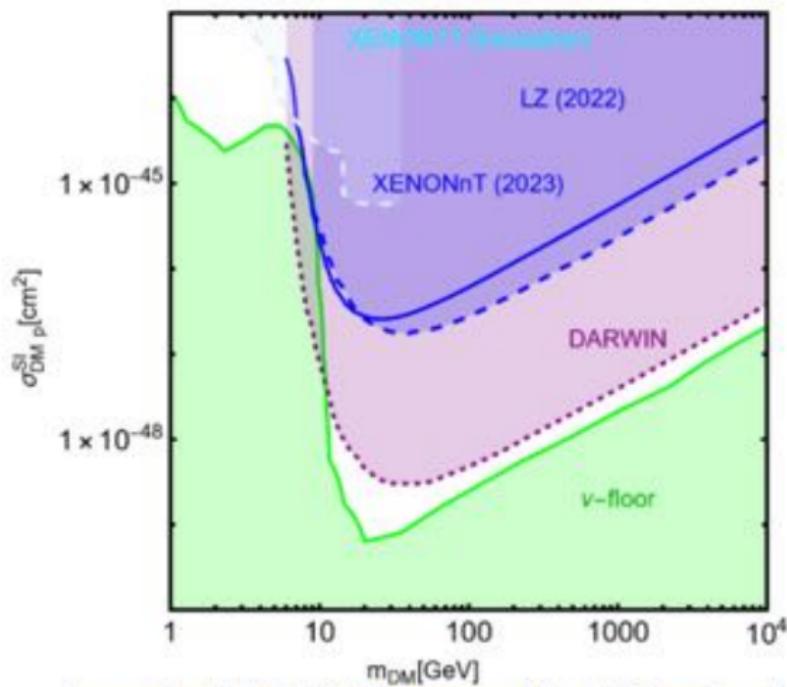
# Colisão de Prótons no LHC



# Detecção Direta - WIMPs

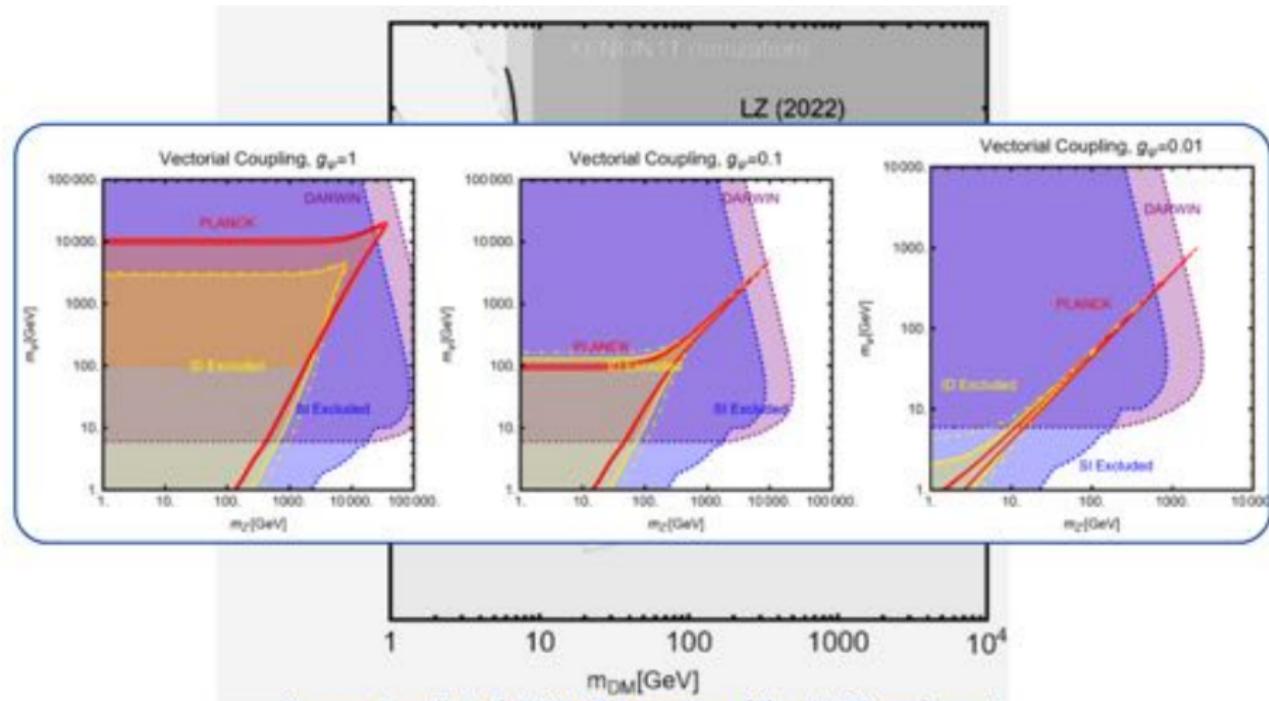


# Limites - Experimentos com Xenônio



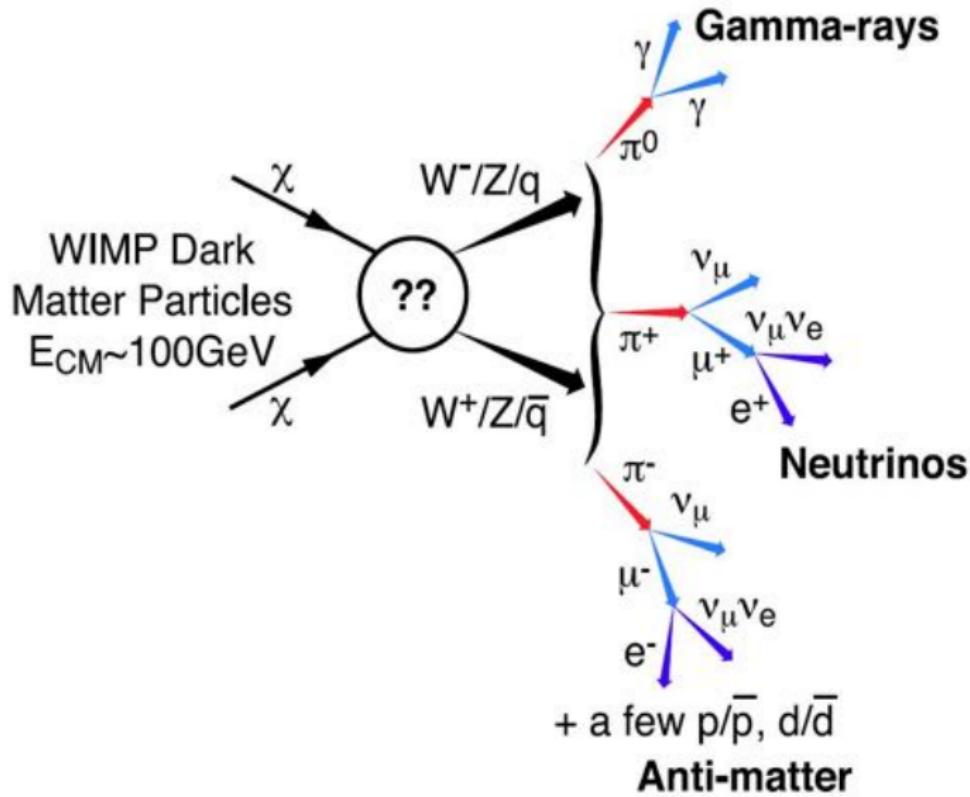
Source: Arcadi et al. 2024, The waning of the WIMP: endgame?

# Limites - Experimentos com Xenônio



Source: Arcadi et al. 2024. The waning of the WIMP: endgame?

# Detecção Indireta



# Ingredientes-chave para detecção indireta

## Target?

- Galactic Center
- Dwarfs
- Galaxy Clusters
- ...

## Channel?

- $\bar{b}b$
- $\bar{\tau}\tau$
- $\bar{\mu}\mu$
- ...

## DM Distribution?

- NFW
- Einasto
- Burkert
- ...

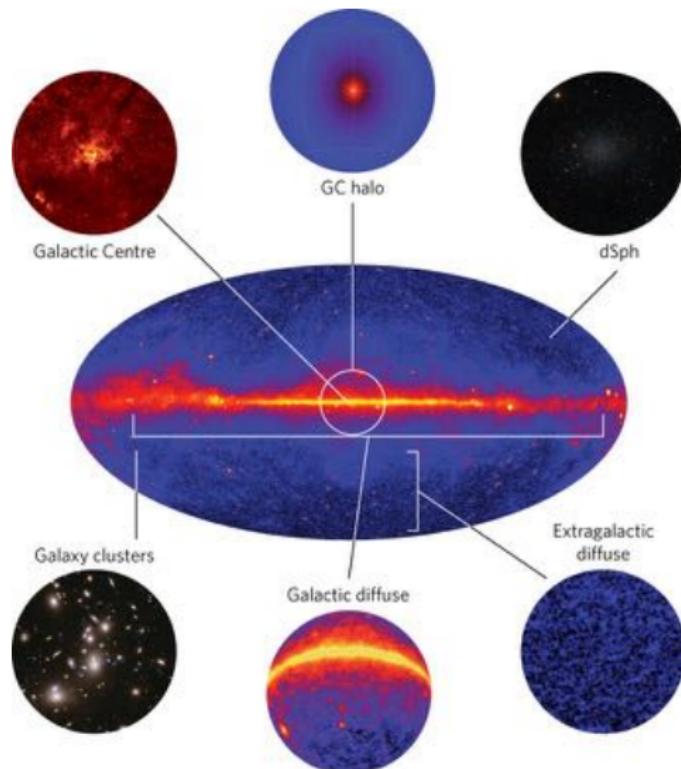
## Background?

## Final State?

- Gamma-Rays
- Neutrinos
- Charged Particles

## Energy?

# Alvos locais: Galáxias Anãs × Centro da Galáxia



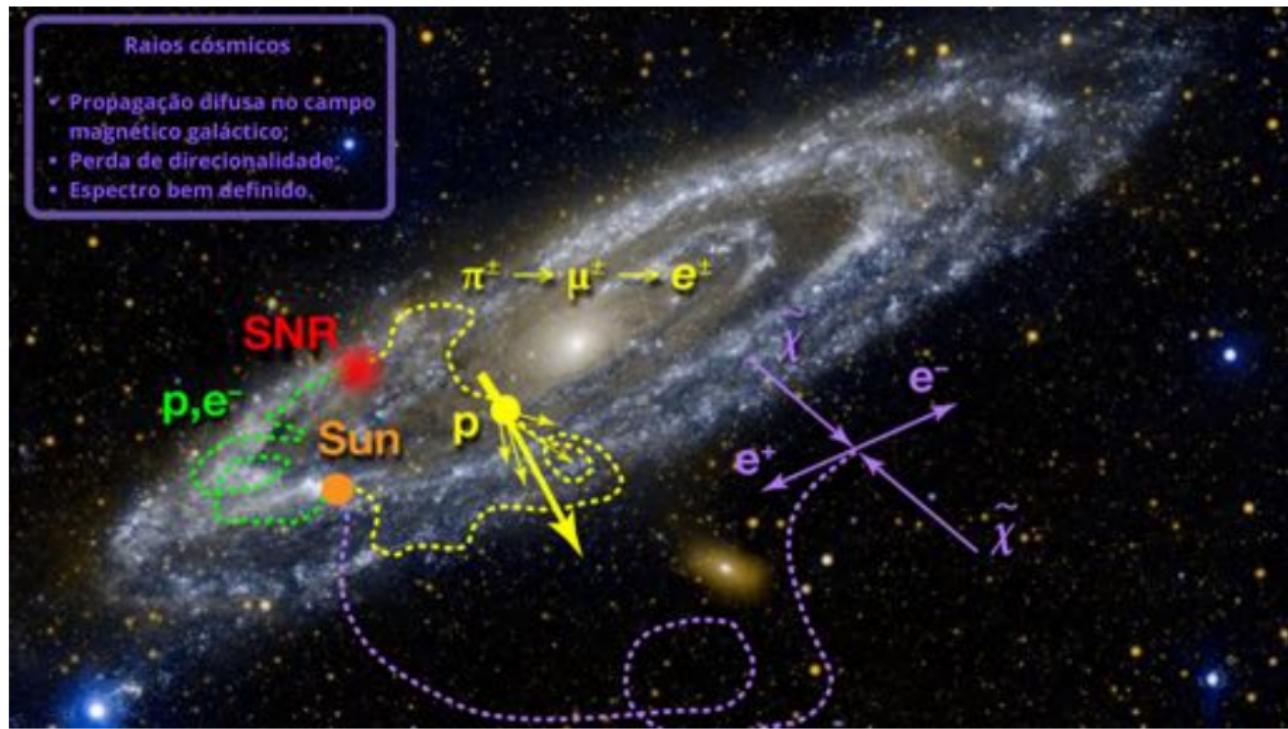
## dSph

- Predominantemente compostos por ME
- Fator-J  $\sim 10^{19}$   $\text{GeV}^2/\text{cm}^{-5}$
- Ausência de ruídos

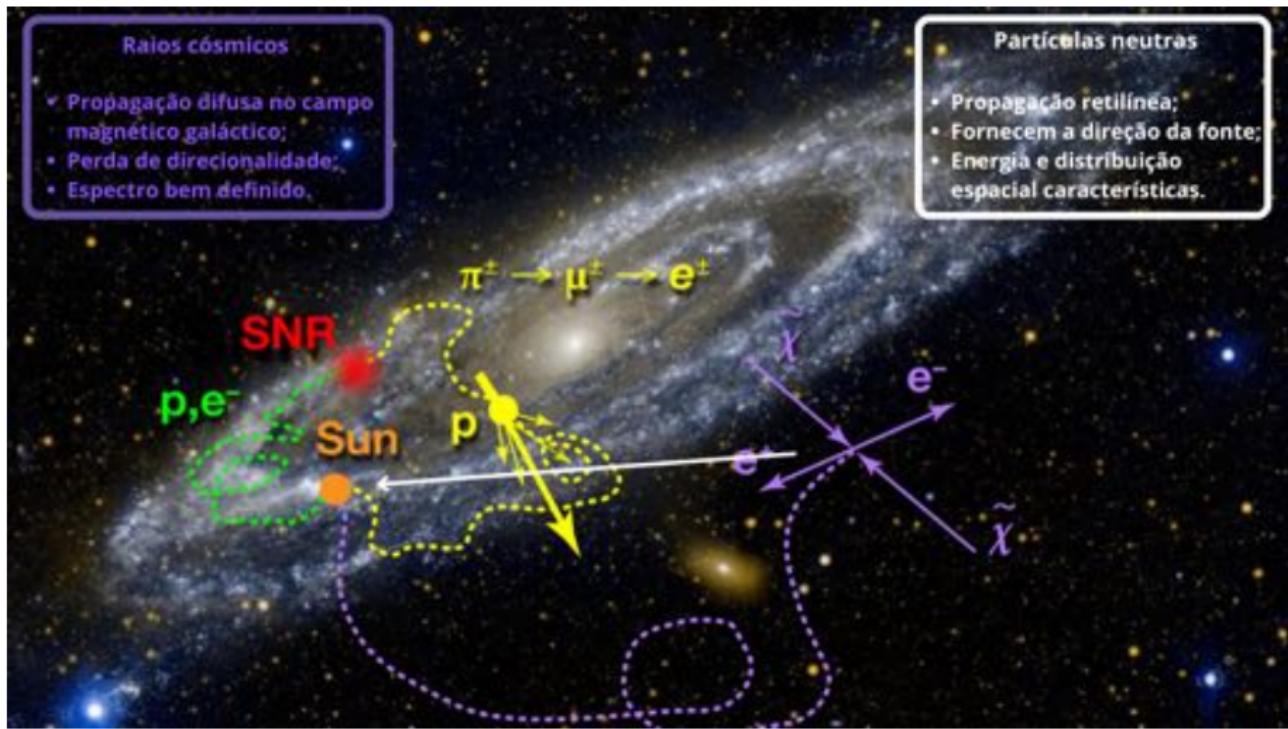
## GC

- Alta densidade de ME
- Fator J  $\mathcal{O}(100)$  vezes maior
- Ruído brilhante e estruturado

# Os mensageiros - Raios cósmicos



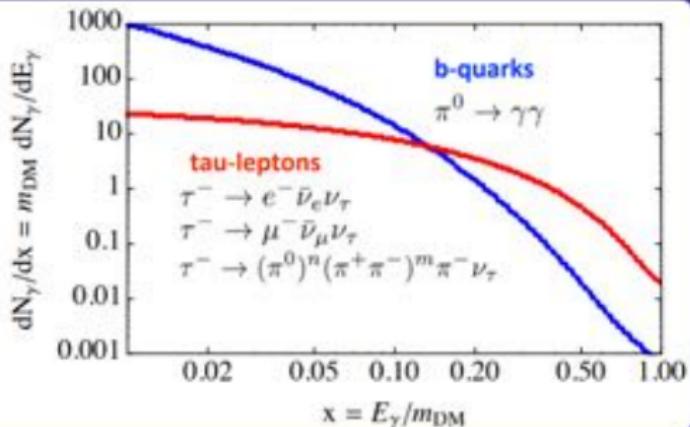
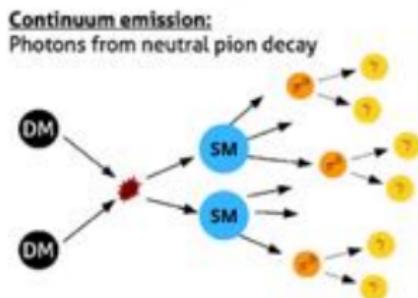
# Os mensageiros - Raios gama e neutrinos



# Fluxo de raios- $\gamma$ gerado pela ME

$$\text{Fluxo de raios-}\gamma: \frac{d\phi_\gamma}{dE} = \underbrace{\frac{\langle\sigma v\rangle}{8\pi m_{DM}^2}}_{\text{Particle Physics}} \underbrace{\frac{dN_\gamma}{dE}}_{\text{J-Factor}} \int ds \int d\Omega \rho_{DM}^2$$

Distribuição espectral de energia

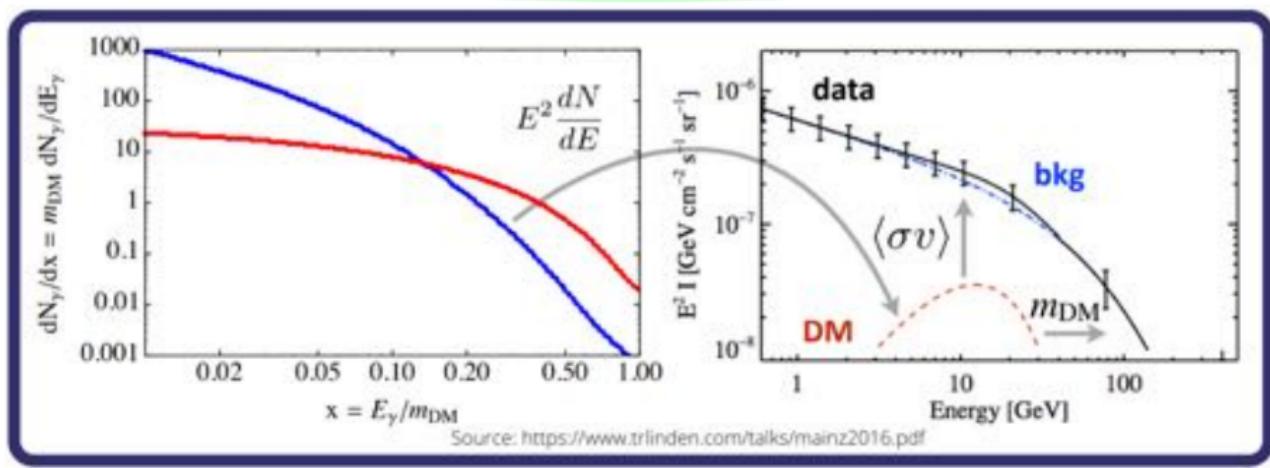


# Fluxo de raios- $\gamma$ gerado pela matéria escura

$$\text{Fluxo de raios-}\gamma: \frac{d\phi_\gamma}{dE} = \frac{\langle\sigma v\rangle}{8\pi m_{DM}^2} \frac{dN_\gamma}{dE} \int ds \int d\Omega \rho_{DM}^2$$

Particle Physics   J-Factor  

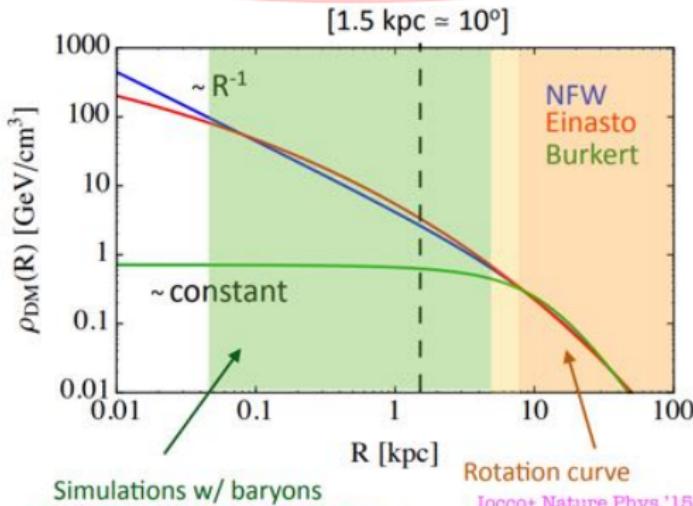
Distribuição espectral de energia



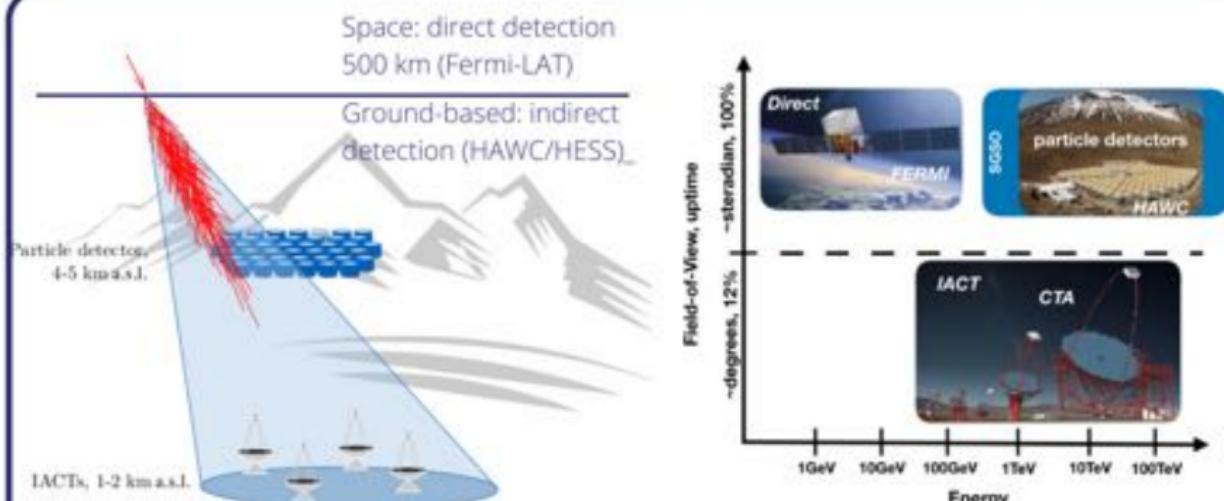
# Fluxo de raios- $\gamma$ gerado pela matéria escura

$$\text{Fluxo de raios-}\gamma: \frac{d\phi_\gamma}{dE} = \underbrace{\frac{\langle \sigma v \rangle}{8\pi m_{DM}^2}}_{\text{Particle Physics}} \underbrace{\frac{dN_\gamma}{dE}}_{\int ds \int d\Omega} \underbrace{\rho_{DM}^2}_{\text{J-Factor}}$$

Distribuição espacial



# Como detectamos os Raios- $\gamma$ ?



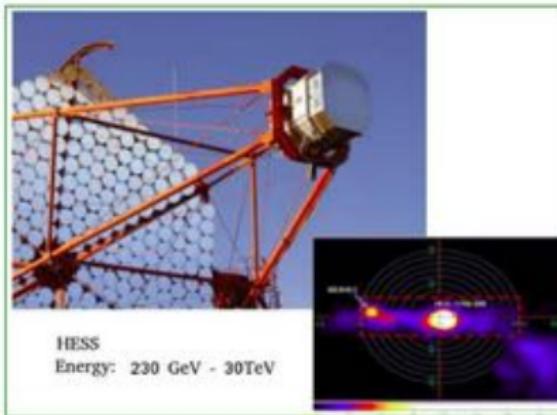
Source: 1902.08429

Figure: Detecção de luz Cherenkov através do CTA.

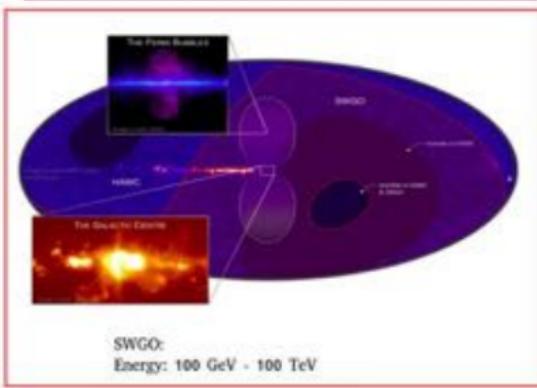
# Experimentos - Raios- $\gamma$



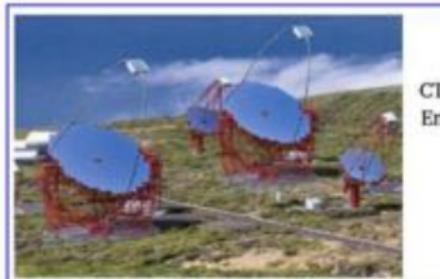
Fermi-LAT:  
Energy: 500 MeV - 500 GeV



HESS  
Energy: 230 GeV - 30TeV



SWGO:  
Energy: 100 GeV - 100 TeV

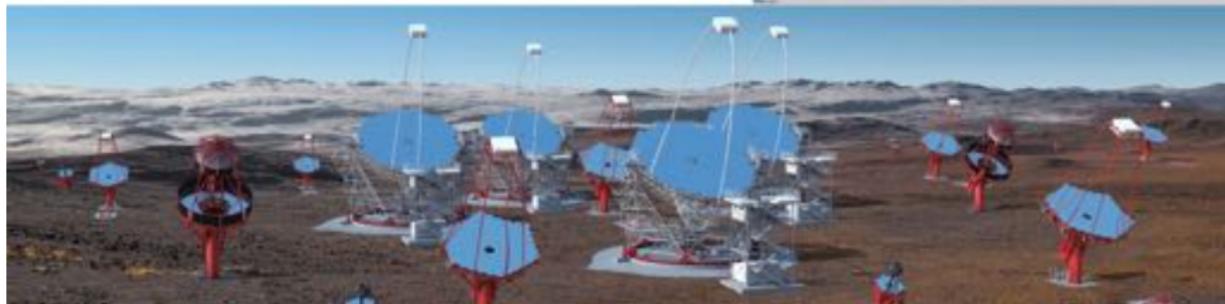


CTA  
Energy: 20 GeV  
- 300 TeV

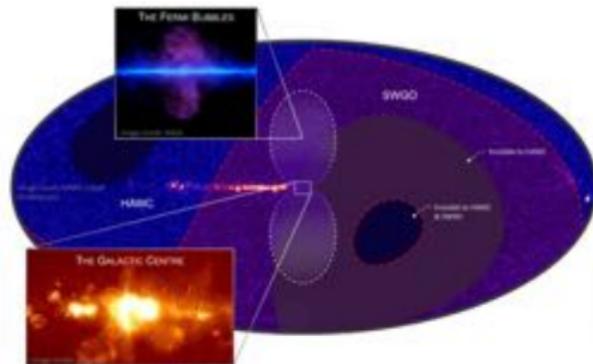
# O futuro em raios- $\gamma$ : O CTAO



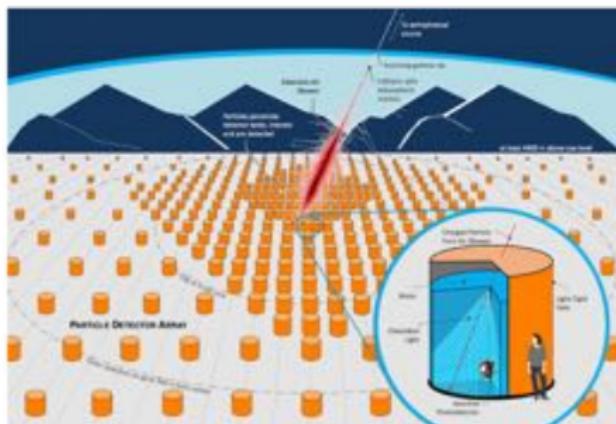
- Localização: Paranal, Chile e La Palma, Espanha;
- Mais de 60 telescópios: pequenos (4m), médios (12m) e grandes (23m);
- Energia: 20 GeV a 300 TeV;
- Método de detecção: Luz Cherenkov.



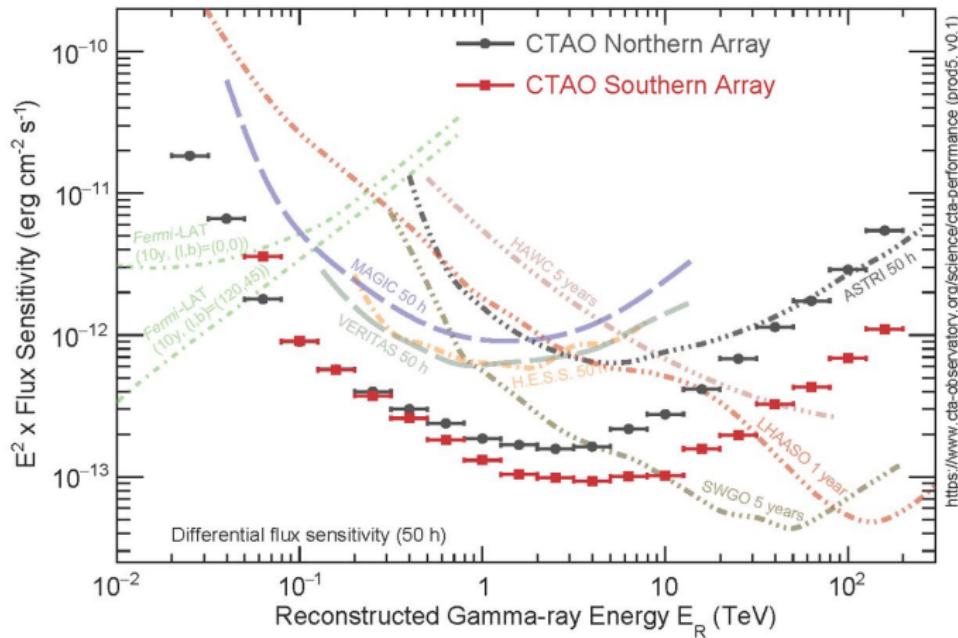
# O futuro em raios- $\gamma$ : O SWGO



- Localização: Pampa La Bola, Chile;
- Energia: 100s GeV a PeV;
- Altitude de 4770 m;
- Detector de partículas através de luz Cherenkov.



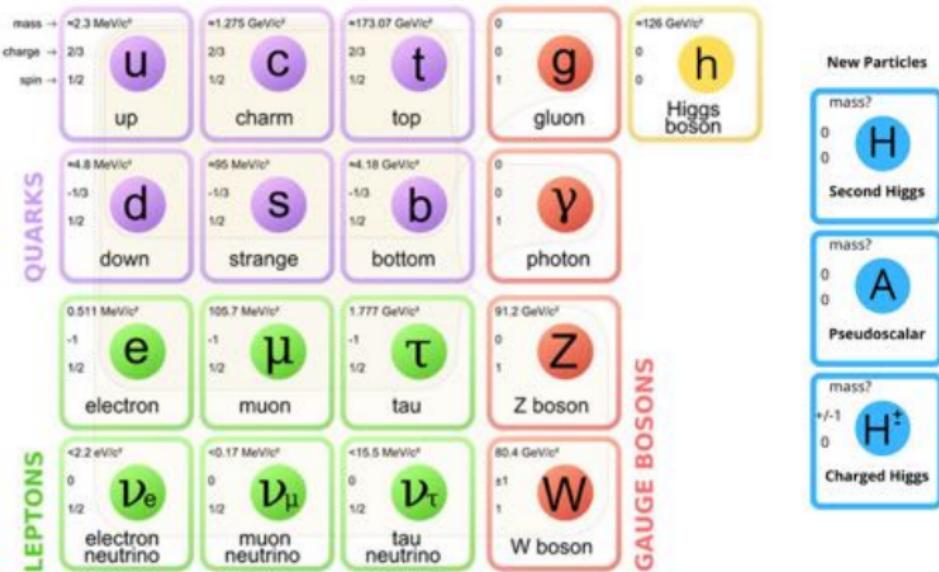
# Sensibilidade de fluxo de CTAO e SWGO



# Sumário

- 1 Motivação**
- 2 Evidências: Quais informações podemos tirar delas?**
- 3 Possíveis Explicações e Candidatos**
- 4 Como produzir?**
  - A abundância de Matéria Escura
- 5 Como detectar?**
  - Aceleradores
  - Detecção Direta
  - Detecção Indireta
- 6 Aplicações**
  - Modelo de dubbleto inerte
  - Modelos *Secluded*

# Aplicação: o modelo de doubleto inerte

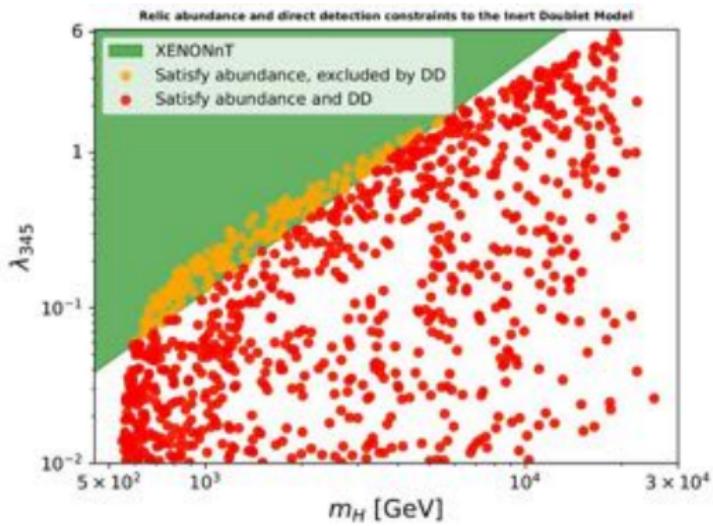
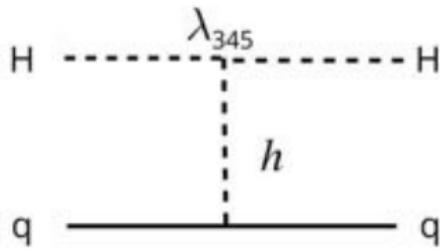


- Simetria  $\mathcal{Z}_2$  estabiliza a ME;
- Sem perda de generalidade, escolhemos o escalar  $H$  como candidato à ME.

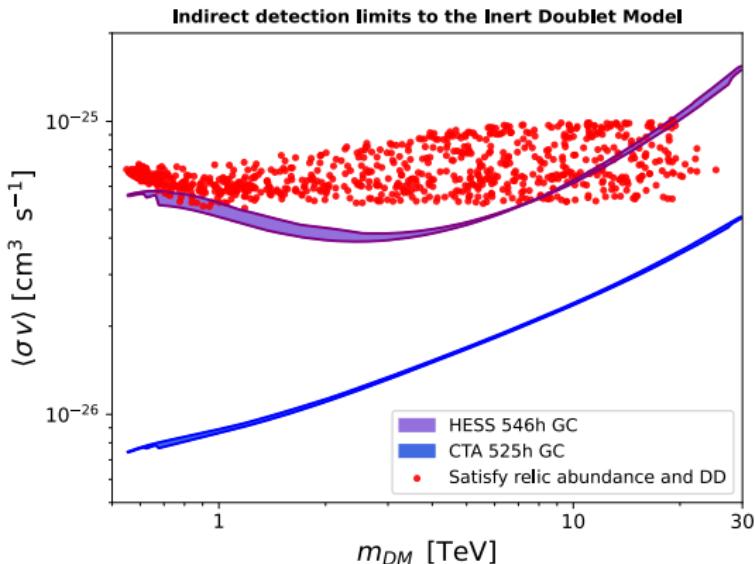
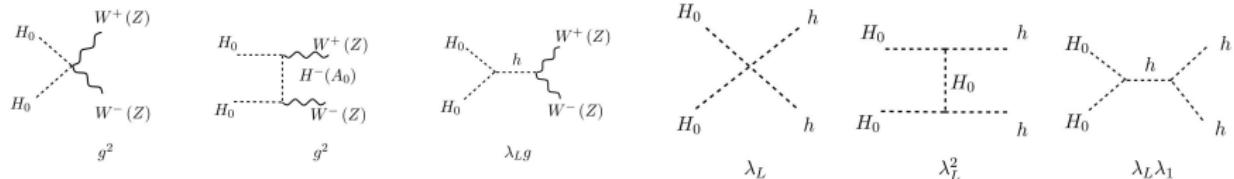
# Detecção direta no IDM

Parâmetros livres:  $(\mu_2, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5) \rightarrow (m_H^2, m_{H^\pm}^2, m_A^2, \lambda_{345}, \lambda_2)$

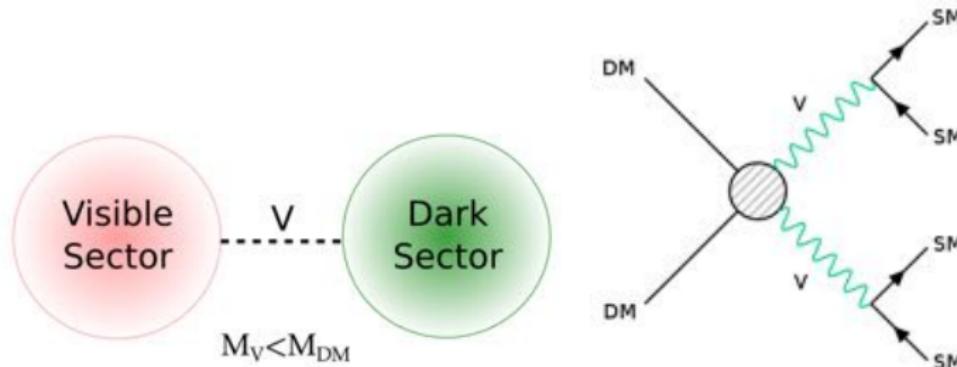
$$\begin{aligned} 0 < \lambda_{345} < 2\pi, \\ 300 \text{ GeV} < m_H < 30000 \text{ GeV}, \\ 0.5 \text{ GeV} < \Delta_+ < 10 \text{ GeV}, \\ 0.5 \text{ GeV} < \Delta_o < 10 \text{ GeV}. \end{aligned} \tag{3}$$



# Detecção indireta no IDM



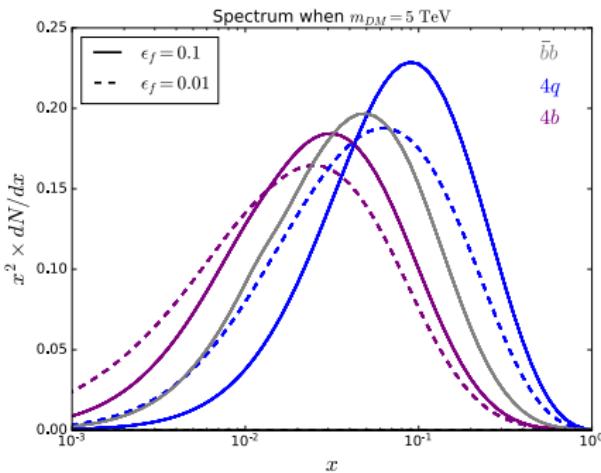
# Aplicações - Modelos *Secluded*



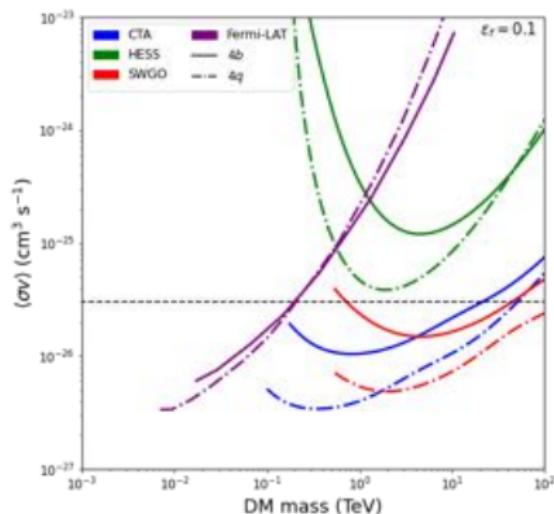
## Motivação

- Escapa dos fortes limites atuais vindos de detecção direta e aceleradores;
- Podem ser testados por experimentos de detecção indireta;
- Iremos focar na escala de TeV;
- Canais:  $V \rightarrow 4e$ ,  $V \rightarrow 4\mu$ ,  $V \rightarrow 4\tau$ ,  $V \rightarrow 4q$ , e  $V \rightarrow 4b$ .

# Resultados Centro Galáctico - Quarks

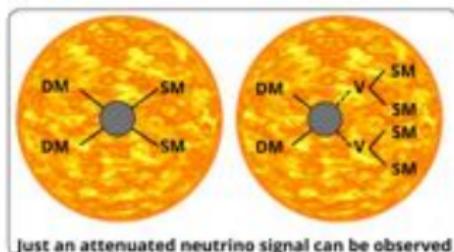


JCAP, 2024. Fortes, Queiroz, C.S., Viana

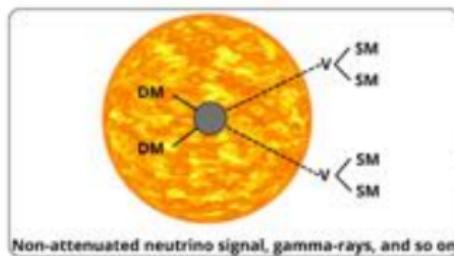


- Limites do H.E.S.S. (atual, 254h) e, SWGO e CTAO (futuros, 10 anos e 500h, respectivamente);
- ON-OFF 2D (energia e espaço) joint-likelihood method.

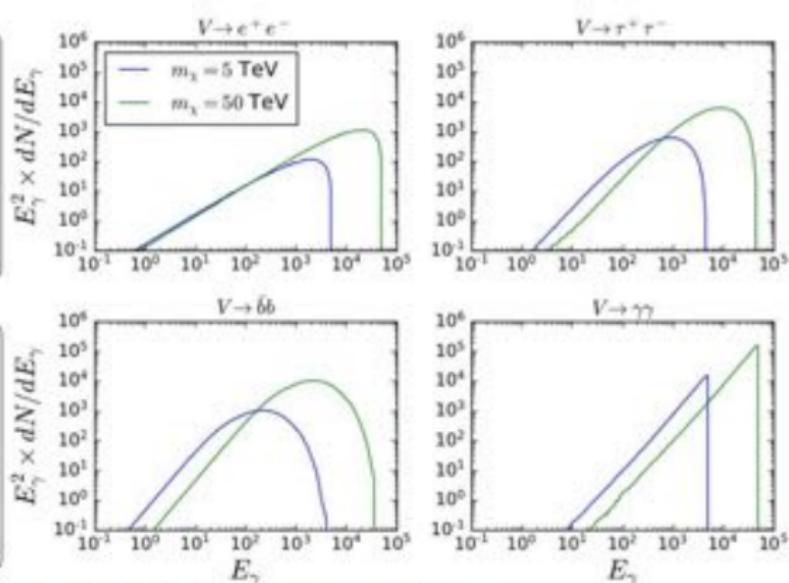
# Busca por modelos *Secluded* no Sol



Just an attenuated neutrino signal can be observed



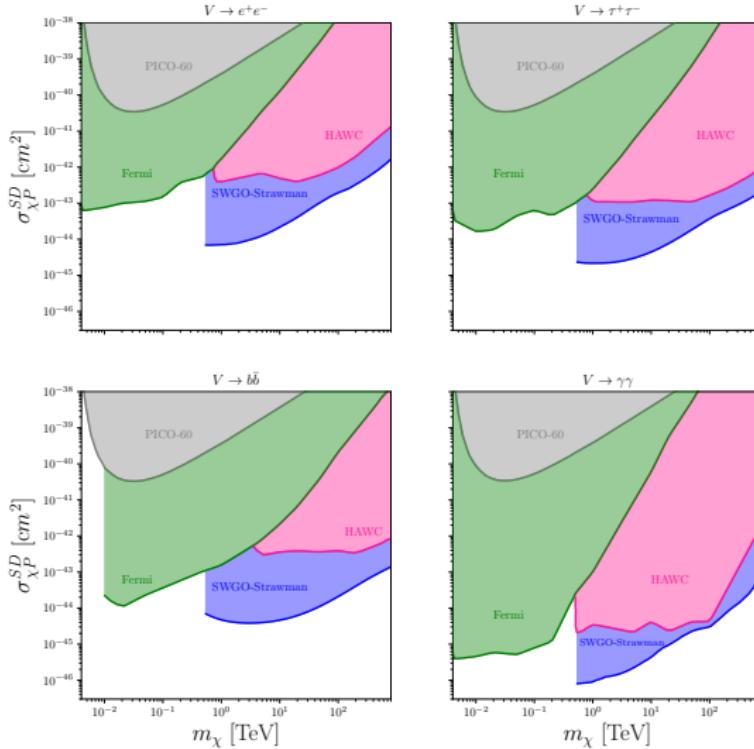
Non-attenuated neutrino signal, gamma-rays, and so on



JCAP, 2024. Andrade, Fagiani, C.S., Souza, Viana.

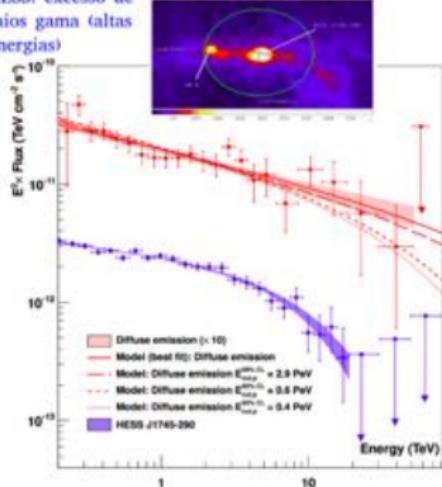
# Resultados: modelos *Secluded* no Sol

JCAP, 2024. Andrade, Fagiani, C.S., Souza, Viana

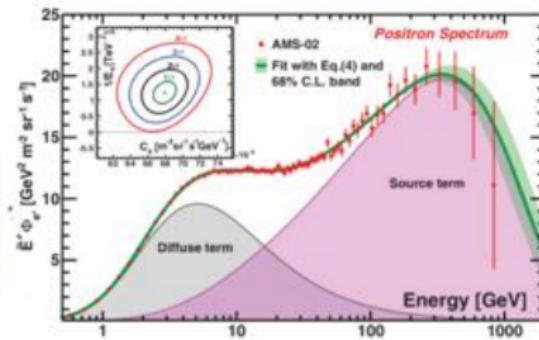


# Possíveis Sinais de ME?

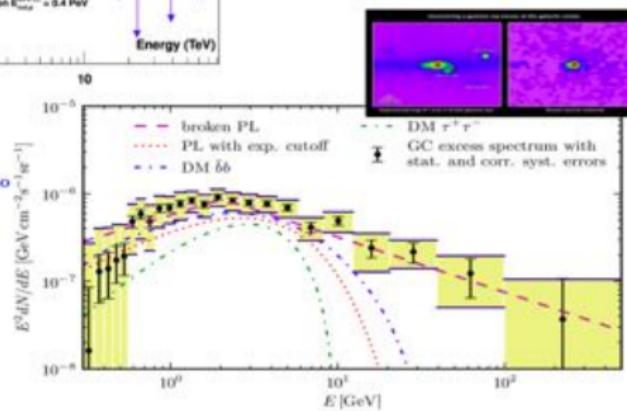
HESS: excesso de raios gama (altas energias)



AMS: Excesso de positrons



Fermi-LAT: excesso de raios gama (baixas energias)



# Mensagens para levar para casa!

- Matéria Escura é um dos principais mistérios da Física Atual;
- Física de partículas é a proposta mais aceita, atualmente, pela comunidade internacional para explicar este problema;
- Apesar das evidências, não detectamos nenhum sinal da partícula de ME, até então;
- Diversos experimentos ao redor do mundo buscam por esta partícula;
- Os experimentos CTAO e SWGO são o futuro na busca indireta por ME na escala de TeV.



[csiiqueira@on.br](mailto:csiiqueira@on.br)



**ME através de raios- $\gamma$ : o  
estado da arte**



Observatório  
Nacional

MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÃO

GOVERNO FEDERAL  
**BRASIL**  
UNIÃO E RECONSTRUÇÃO

**ESCOLA DE INVERNO  
EM ASTROFÍSICA 2025**

# O Brasil na busca por Matéria Escura



LHCb: CBPF-UFRJ-PUC RIO-UNB-CEFET RJ	ATLAS: UFJF-UFRJ-USP - UERJ-UFGA-UFRN	CMS: CBPF-UERJ-UNESP-UFABC-UNICAMP-UFRGS-UFRN-UEAM	LH-LHC: CBPF-UFRJ-PUC RIO-UNB-CEFET RJ-UFG-UFABC-UNICAMP-UFRGS-UFRN-UFABC-UFMS-UEAM
FCC: CBPF-UFRN	CTA: CBPF-UFABC-UFRJ-USP-UFSCAR-UFES-UFRN-UNESP	SWGO: CBPF- USP-IFF-UFCG	DARKSIDE: USP
CYNO: UNICAMP-UFJF - CBPF	OSCURA: UFRJ	LSST: UNESP-LineA-ON-UnB	J-PAS: ON-USP-UFBA-UFGRS
ET: UNESP-UFES - UFF - UFRJ	BINGO: USP-INPE -UFCG-UNIFEI -UES	LISA: UFMG,UFJF	DES: USP-LineA-UNESP-UNICAMP-ON
HYPER - KAMIOKANDE: PUC-RIO	CONNIE: UFRJ- CBPF-CEFET RJ-ITA- UFABC	SBND: UFRP- UNIFAL-UFGRJ-CBPF-USP UFG-UFF-UFABC-ITA- CTI Renato Archer	DUNE: UFRP- UNIFAL-UFGRJ-CBPF-USP UFG-UFF-UFABC-ITA- CTI Renato Archer

Figure: Experimentos com participação brasileira buscando pelo setor escuro.  
Cedida por Lucia Angel.

# O Brasil na busca por Matéria Escura

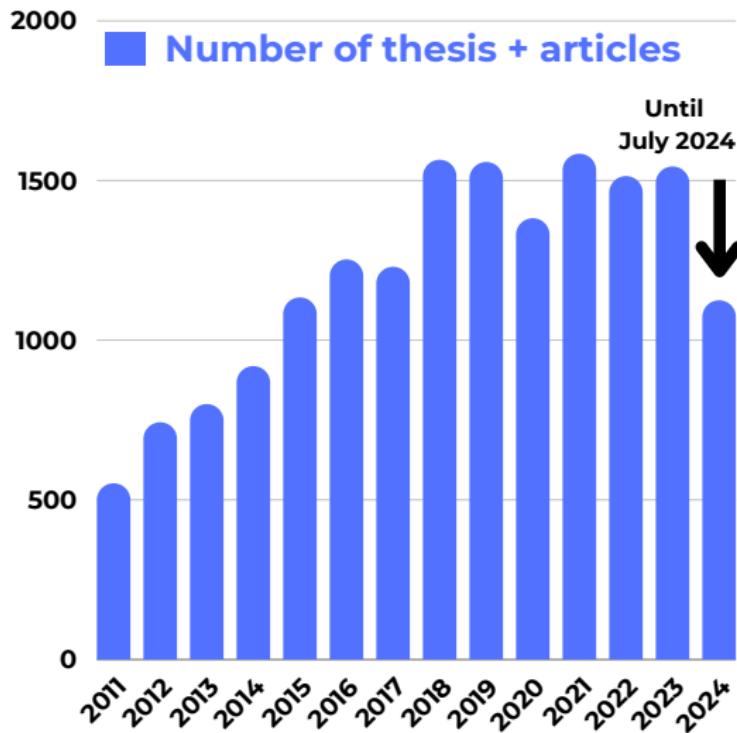


Figure: Teses e artigos em Matéria escura. Fonte: Cedida por F. Queiroz.

# References I

-  [1] Neto, Gastão.  
*Notas de aula: Introdução à Dinâmica Estelar*, 2000. Cap.1.  
<http://www.astro.iag.usp.br/~gastao/dinamica/CursoDin2000.pdf>
-  [2] M. Lisanti,  
*Lectures on Dark Matter Physics*,  
[doi:10.1142/9789813149441\\_0007](https://doi.org/10.1142/9789813149441_0007). [arXiv:1603.03797 [hep-ph]].
-  [3] Profumo, S.  
*An Introduction to Particle Dark Matter*.  
World Scientific, 2017.
-  [4] J. R. Brownstein and J. W. Moffat,  
*Galaxy rotation curves without non-baryonic dark matter*, *Astrophys. J.* **636**, 721-741 (2006) [doi:10.1086/498208](https://doi.org/10.1086/498208)  
[arXiv:astro-ph/0506370 [astro-ph]].

# References II

- [5] S. Dodelson,  
*The Real Problem with MOND*, Int. J. Mod. Phys. D **20**, 2749-2753 (2011) doi:10.1142/S0218271811020561 [arXiv:1112.1320 [astro-ph.CO]].
- [6] J. D. Bekenstein,  
*Relativistic gravitation theory for the MOND paradigm*, Phys. Rev. D **70**, 083509 (2004) doi:10.1103/PhysRevD.70.083509 [arXiv:astro-ph/0403694 [astro-ph]].

# References III



[7] Grzegorz Pietrzynski,

*Twenty-five years of using microlensing to study dark matter,*

[https://www.nature.com/articles/d41586-018-07006-8?WT.ec\\_id=NATURE-20181018&utm\\_source=nature\\_etoc&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=20181018&sap-outbound-id=BA763A4705357B88F64128490ACF9E73AE7D01A7](https://www.nature.com/articles/d41586-018-07006-8?WT.ec_id=NATURE-20181018&utm_source=nature_etoc&utm_medium=email&utm_campaign=20181018&sap-outbound-id=BA763A4705357B88F64128490ACF9E73AE7D01A7)



[8] M. Dutra,

*Origins for dark matter particles : from the "WIMP miracle" to the "FIMP wonder",*

Thesis: PhD Orsay, LPT.

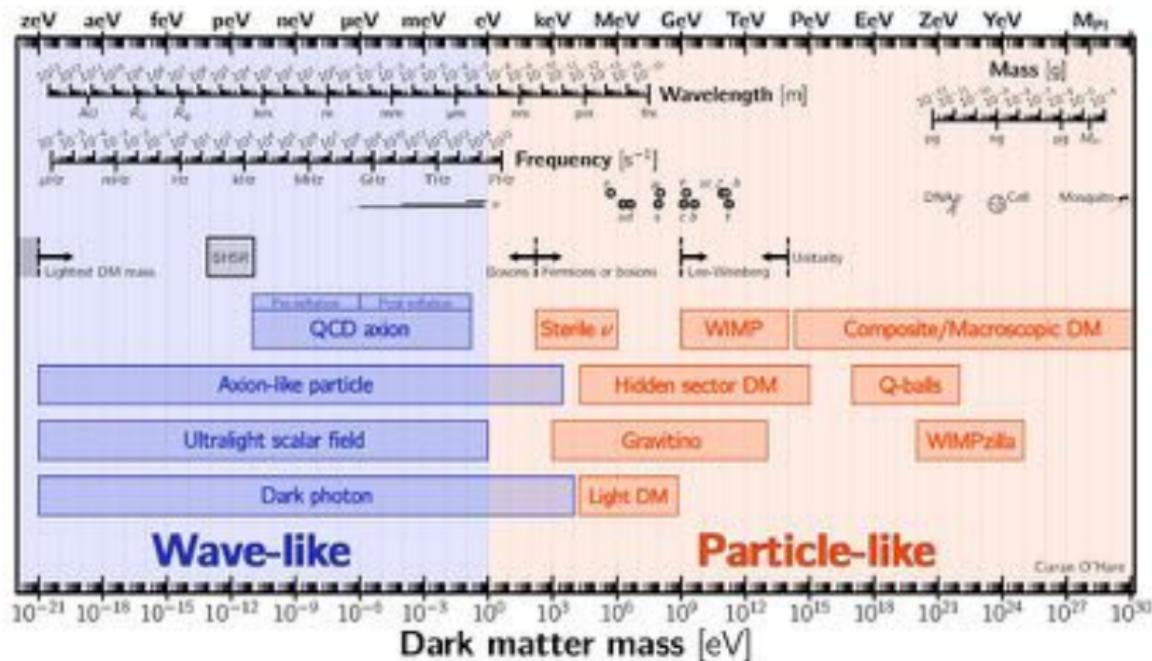


[9] CTA collaboration.

*How CTA works?*

<https://www.cta-observatory.org/about/how-cta-works/>

# Outros candidatos



# Rubin e as Curvas de rotação

## Perfil de halo NFW

$$\rho_{DM}(r) = \frac{\rho_s}{r/r_s(1+r/r_s)^2}$$

com  $r_s = 20$  kpc e  $\rho_s = 0.01056 M_\odot \text{ pc}^{-3}$ .

Da cinemática de estrelas é possível inferir:  $M_{halo} = 10^{12} M_\odot$  e  $\rho_0 = 0.4 \text{ GeV/cm}^3$ .

# Rubin e as Curvas de rotação

## Perfil de halo NFW

$$\rho_{DM}(r) = \frac{\rho_s}{r/r_s(1+r/r_s)^2}$$

com  $r_s = 20$  kpc e  $\rho_s = 0.01056 M_\odot \text{ pc}^{-3}$ .

Da cinemática de estrelas é possível inferir:  $M_{halo} = 10^{12} M_\odot$  e  $\rho_0 = 0.4 \text{ GeV/cm}^3$ .

Utilizando este perfil de halo e supondo uma simetria esférica, podemos estimar o raio deste halo:

$$M_{halo} \sim 4\pi \int_0^{R_{halo}} dr \ r^2 \rho_{DM}(r) \rightarrow R_{halo} \sim 100 \text{ kpc} \quad (4)$$

Para galáxias espirais:  $R_{disco} \sim 10 \text{ kpc} \Rightarrow R_{halo} \sim 10R_{disco}$ .

# MACHOs

- Objetos massivos de halo compacto (anãs marrons, estrelas de nêutrons, buracos negros);

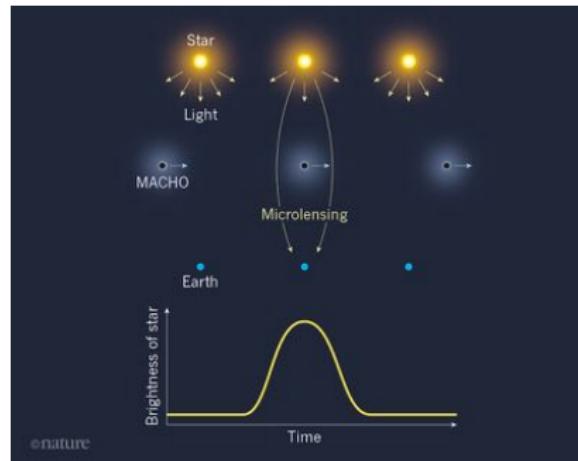


Figure: Nature article. [7]

# MACHOs

- Objetos massivos de halo compacto (anãs marrons, estrelas de nêutrons, buracos negros);
- Compostos de bárions e emitem pouquíssima radiação;

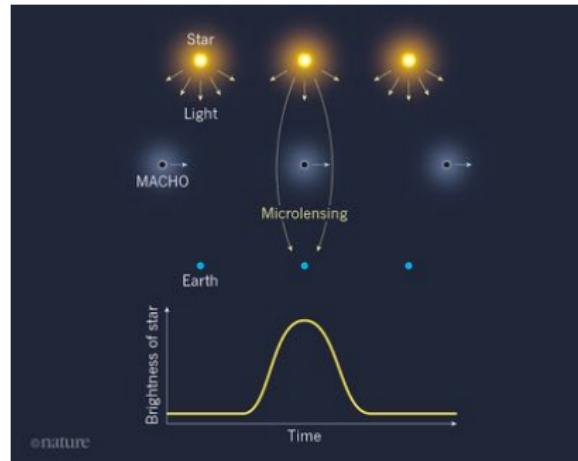


Figure: Nature article. [7]

# MACHOs

- Objetos massivos de halo compacto (anãs marrons, estrelas de nêutrons, buracos negros);
- Compostos de bárions e emitem pouquíssima radiação;
- **Podem ser observados através de microlensing;**

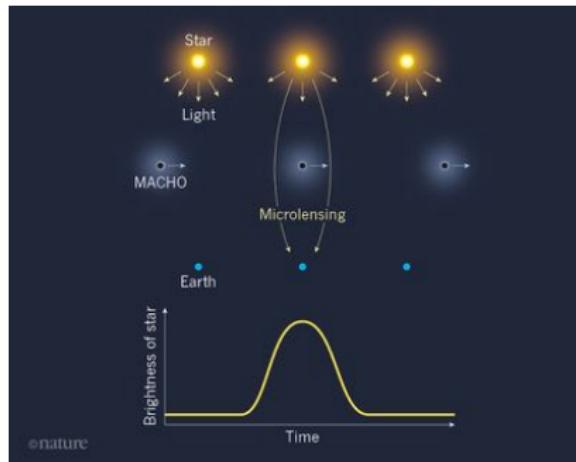


Figure: Nature article. [7]

# MACHOs

- Objetos massivos de halo compacto (anãs marrons, estrelas de nêutrons, buracos negros);
- Compostos de bárions e emitem pouquíssima radiação;
- Podem ser observados através de microlensing;
- **Medidas apontam uma abundância muito menor do que a necessária:  $\Omega_{DM} < 10\%$ .**

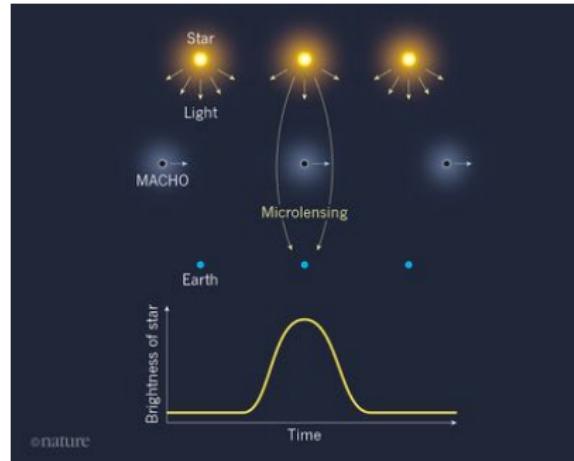


Figure: Nature article. [7]

# PBHs

## ■ Buracos Negros primordiais;

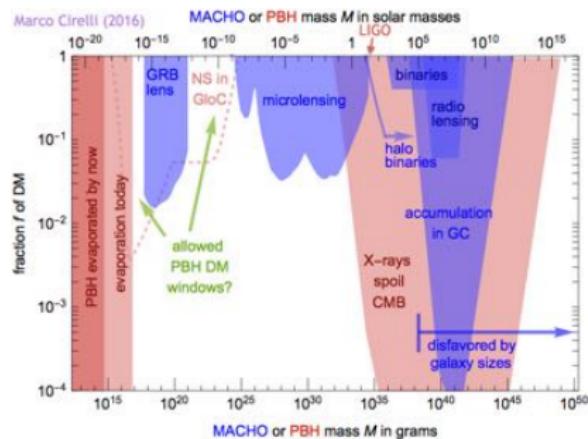


Figure: Imagem tirada de Resonaances

<http://resonaances.blogspot.com/2016/06/black-hole-dark-matter.html>.

# PBHs

- Buracos Negros primoriais;
- Formados no início do Universo;

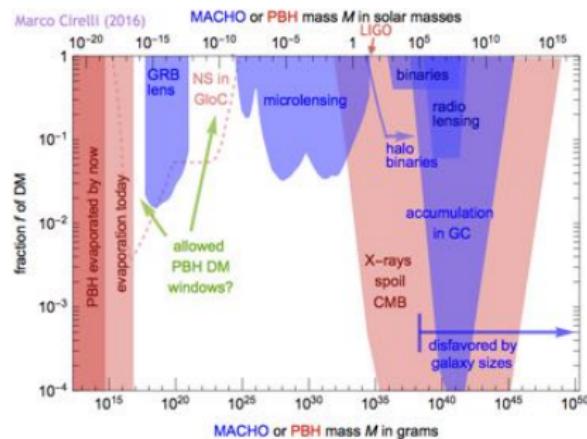


Figure: Imagem tirada de Resonaances

<http://resonaances.blogspot.com/2016/06/black-hole-dark-matter.html>.

# PBHs

- Buracos Negros primoriais;
- Formados no início do Universo;
- Ganharam mais atenção após a observação de ondas gravitacionais pelo LIGO.

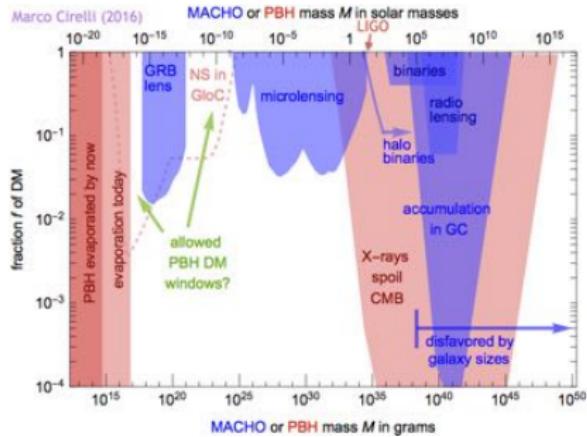
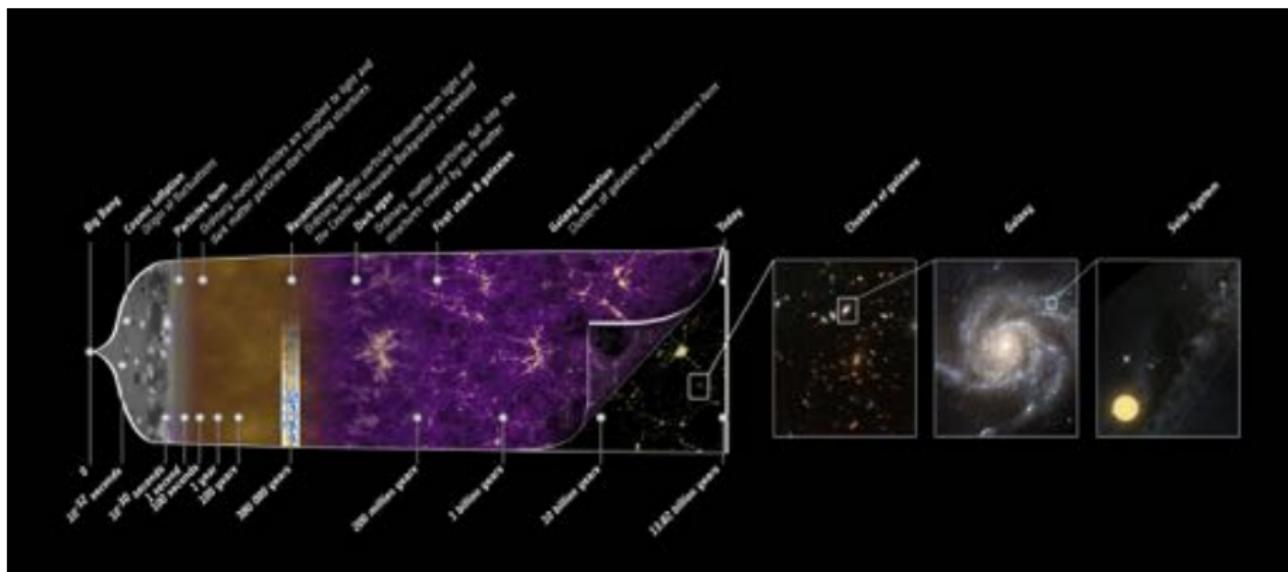


Figure: Imagem tirada de Resonaances

<http://resonaances.blogspot.com/2016/06/black-hole-dark-matter.html>.





[csiqueira@on.br](mailto:csiqueira@on.br)



**ME através de raios- $\gamma$ : o  
estado da arte**



Observatório  
Nacional

MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÃO

GOVERNO FEDERAL  
**BRASIL**  
UNIÃO E RECONSTRUÇÃO

**ESCOLA DE INVERNO  
EM ASTROFÍSICA 2025**