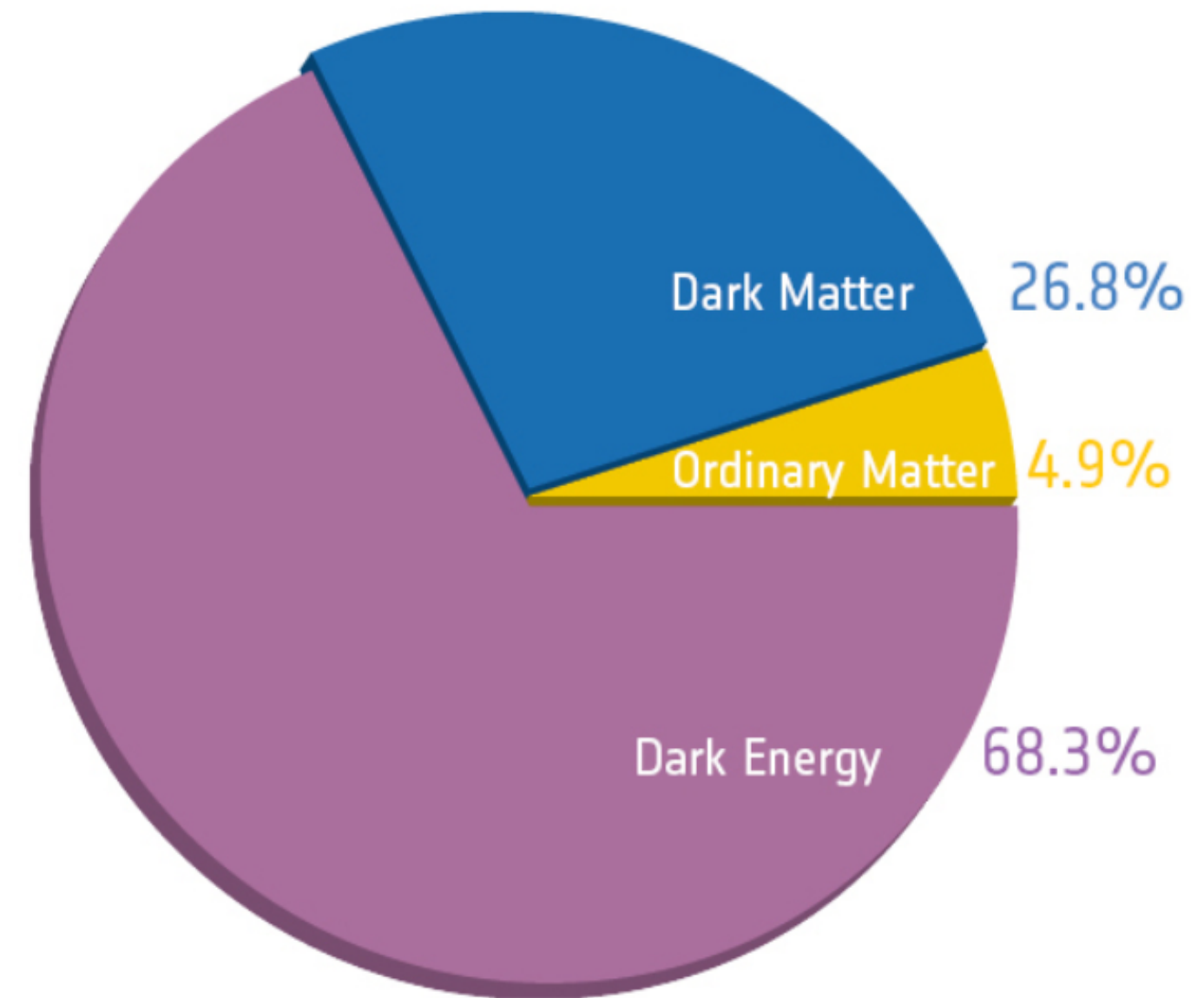


Raios gama na busca por matéria escura

LUCAS RODRIGUES RUBIO

Um grande problema

Estima-se que matéria ordinária (modelo padrão) compõe aproximadamente 15% do contingente de matéria do universo.



Proporção de matéria e energia no universo [1].

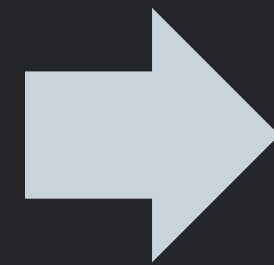
Evidências para matéria escura

- Em 1933, Fritz Zwicky notou que galáxias das bordas no superaglomerado de Coma estavam se movendo mais rapidamente do que o esperado [2].
 - Concluiu que deveria haver uma grande quantidade de matéria invisível denominada “matéria escura” contribuindo para a energia potencial gravitacional do sistema;
 - Foi estimado que a proporção desta matéria invisível para a matéria comum era da ordem de 100 a 400;
 - Porém Zwicky tinha problemas para estimar a massa do cluster, subestimando a quantidade de gás nas galáxias fora de sistemas estelares;
 - Com técnicas mais avançadas previsão da quantidade de gás utilizando detecção de raios-x, esta proporção caiu para 5 a 6.

Evidências para matéria escura

- Já nos anos 70, Rubin, Ford, e Thonnard estavam estudando a velocidade rotacional de estrelas em galáxias espirais utilizando redshift e notaram novamente uma discrepância entre a previsão e a medição de velocidades.
 - Partindo das leis de Newton para gravitação, podemos ter uma noção de como deveria ser a curva de velocidades das estrelas em uma galáxia em função do seu raio de rotação aproximando uma distribuição mássica esférica:

$$F = \frac{GmM(r)}{r^2} = \frac{mv^2(r)}{r}$$



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

Evidências para matéria escura

- Considerando que as galáxias espirais possuem um centro muito massivo com um disco fino o envolvendo, podemos assumir que a massa cresce com r^3 até chegar ao raio deste centro R_c e após isso a massa independe do raio (quando estamos no disco), obtendo uma previsão para a velocidade rotacional das estrelas:

$$v(r) \propto \begin{cases} r & r \ll R_c \\ r^{-1/2} & r \gg R_c \end{cases}$$

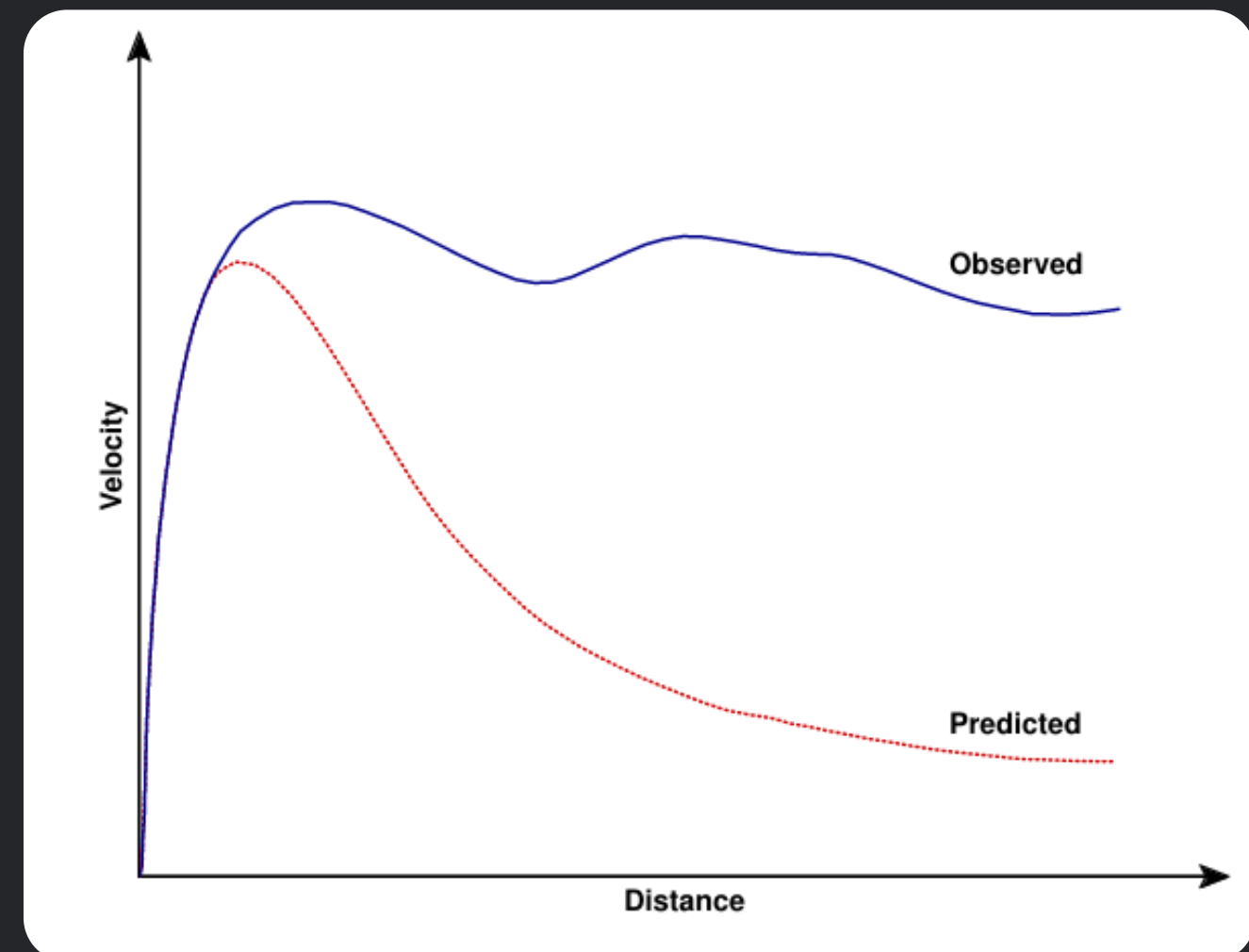
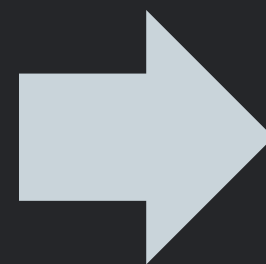


Gráfico das curvas de velocidades prevista e observada de estrelas em uma galáxia [1].

Evidências para matéria escura

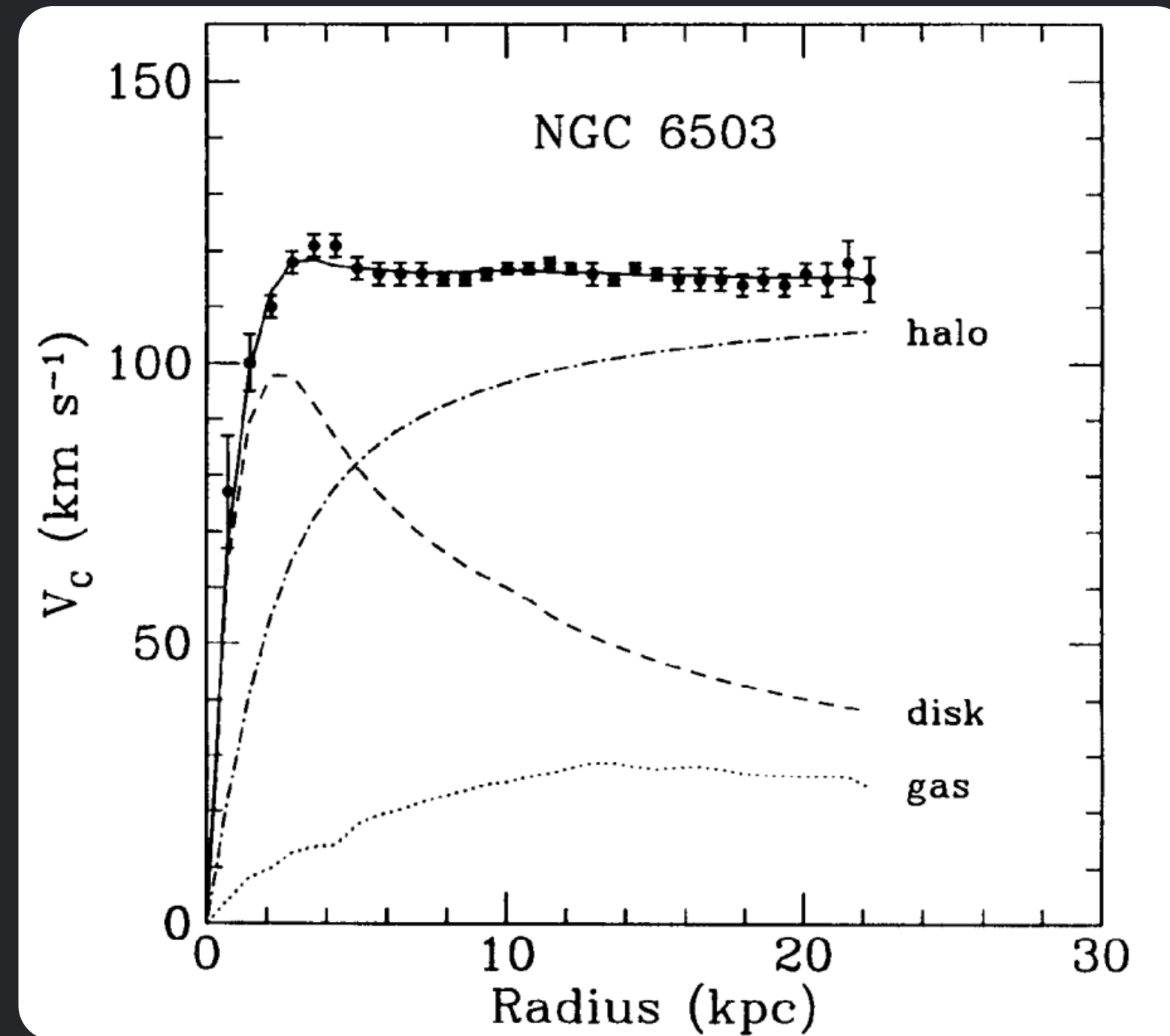


Gráfico da curva de velocidades observada de estrelas na galáxia NGC 6503 e as contribuições previstas do gás, disco e halo de matéria escura [4].

Evidências para matéria escura

Lentes Gravitacionais

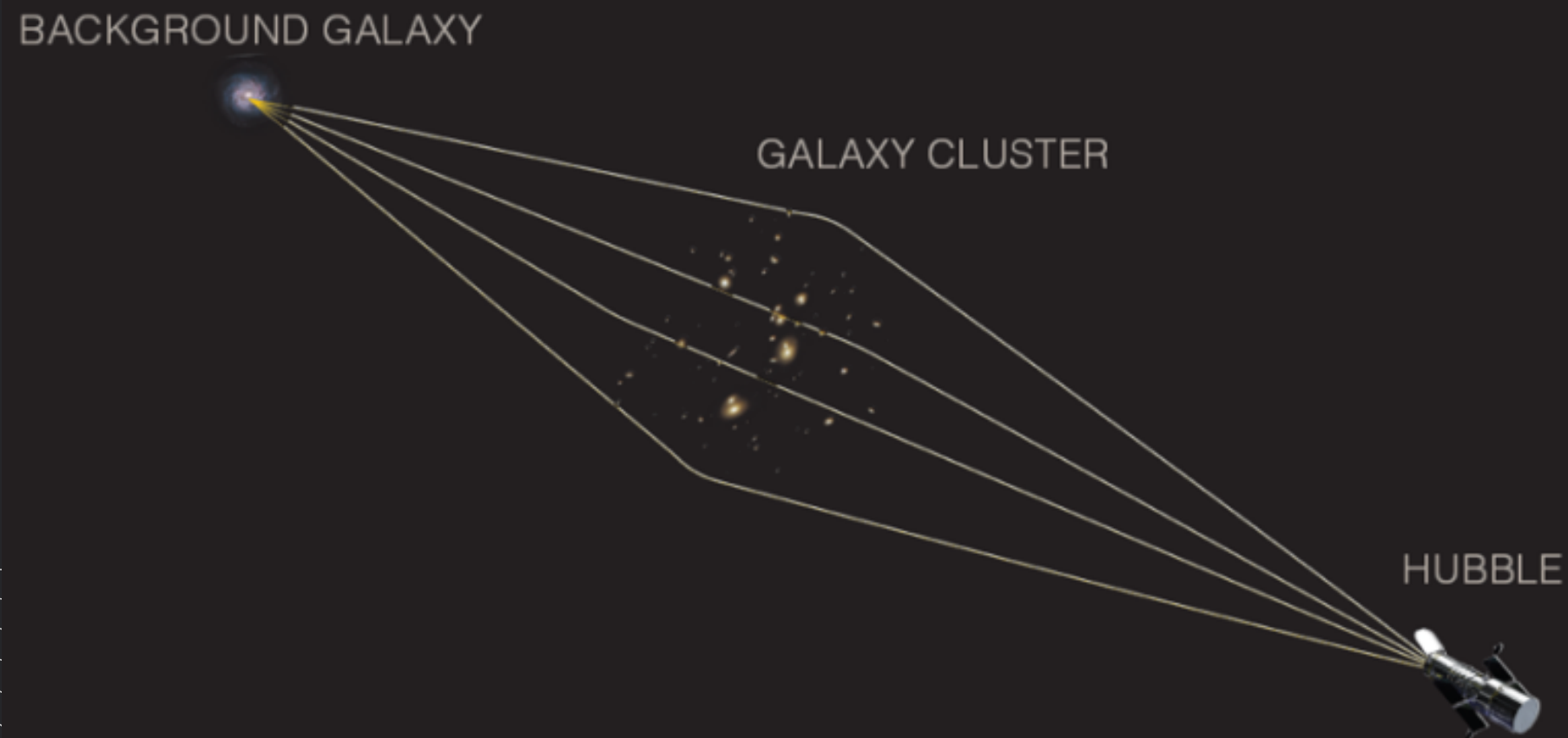
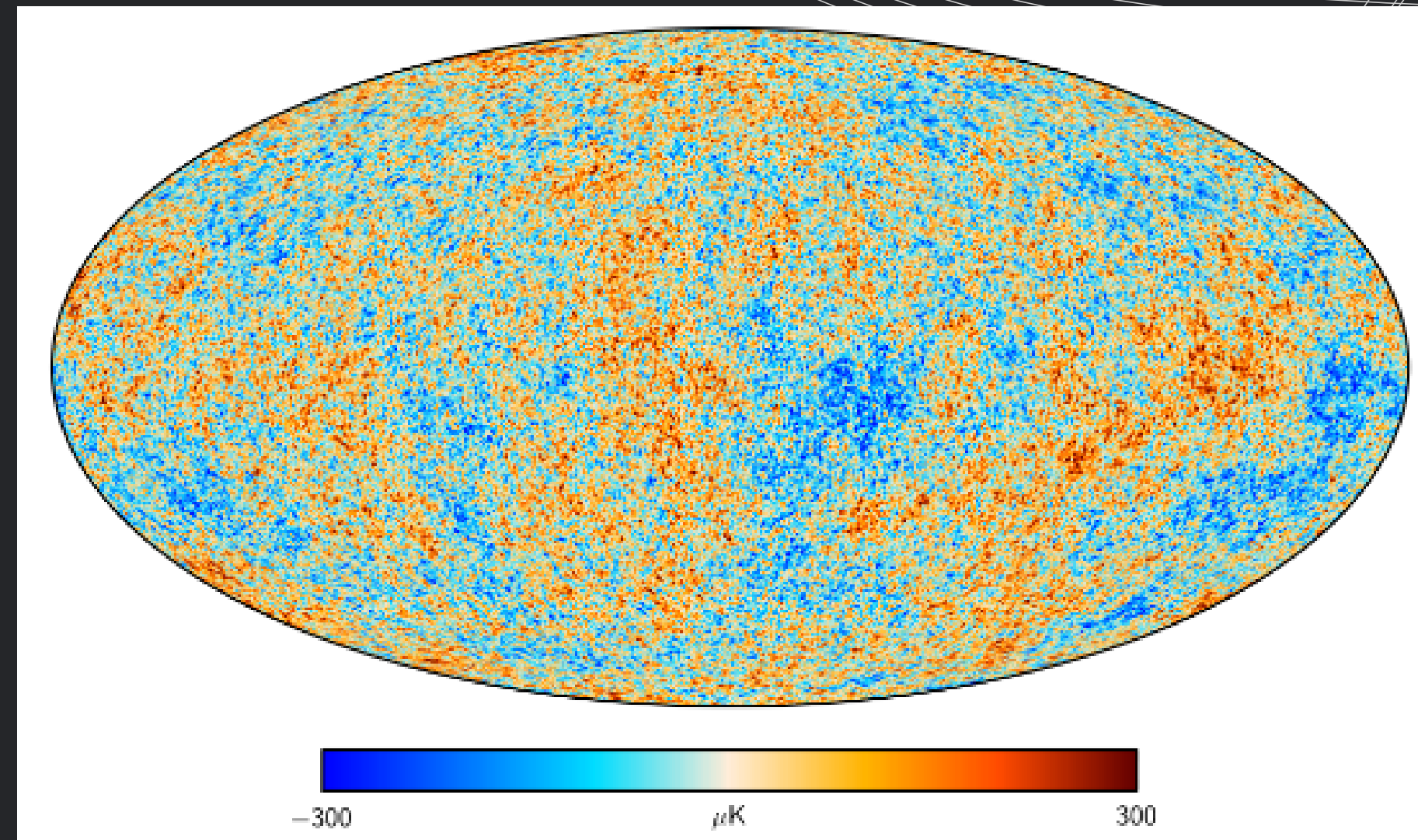


Ilustração da luz de galáxias distantes sendo defletidas pelo campo gravitacional de aglomerados de galáxias.

Fonte: NASA/JPL-Caltech, 2010

Radiação Cósmica de Fundo



Anisotropias de temperatura na radiação cósmica de fundo observada pelo satélite Planck em 2015.

Fonte: ESA e Planck Collaboration

Propriedades da matéria escura

- 1. ELÉTRICAMENTE NEUTRA:** Não interage ou interage muito fracamente eletromagneticamente, sendo invisível para os nossos telescópios por não emitir nem absorver radiação. Além disso, a matéria escura não perde energia por irradiação, fazendo com que ela não colapse para o centro da galáxia como a matéria comum;
- 2. INTERAÇÃO FRACA:** A matéria escura interage intensamente somente através da gravidade, sendo necessário que não haja interação através de outras forças ou que essa interação seja muito fraca;
- 3. ESTÁVEL:** Como há indícios da sua existência no início do universo, a matéria escura deve ser estável em escalas de tempo cosmológicas ou sua destruição e produção devem estar em equilíbrio;
- 4. FLUIDA:** A matéria escura se comporta como fluido em largas escalas, não tendo sido detectada nenhuma forma de granulação.

Alguns candidatos

- **WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles):**

- Partículas eletricamente neutras e não bariônicas que interagem somente através da força nuclear fraca;
- Produzidas termicamente no início do universo com massa na faixa de TeV;
- Podem se autoaniquilar, produzindo raios gama que podem ser detectados como evidência de sua existência.

- **Neutrinos estéreis:**

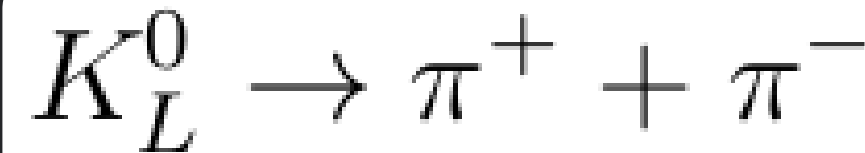
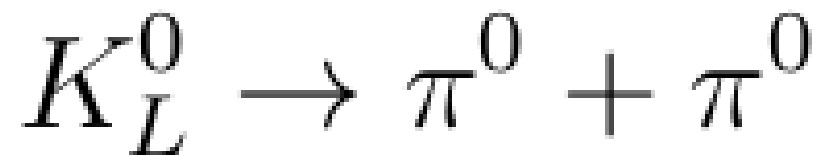
- Neutrinos de mão direita que não interagem via força nuclear fraca, apenas gravitacionalmente;

- **Modificações na teoria da relatividade geral:**

- Ao invés de assumir que há partículas desconhecidas, as evidências para matéria escura podem ser explicadas por um novo regime no qual a atual teoria de gravitação não se aplica.

ALPs (Axion-Like Particles)

- Partículas elementares leves (10^{-6} eV \sim 1 eV) e neutras que interagem fracamente com bárions, léptons e fótons ;
- Propostos para solucionar a violação de simetria CP descoberta por Cronin e Fitch [4] em 1964 no decaimento de káons neutros em dois píons:

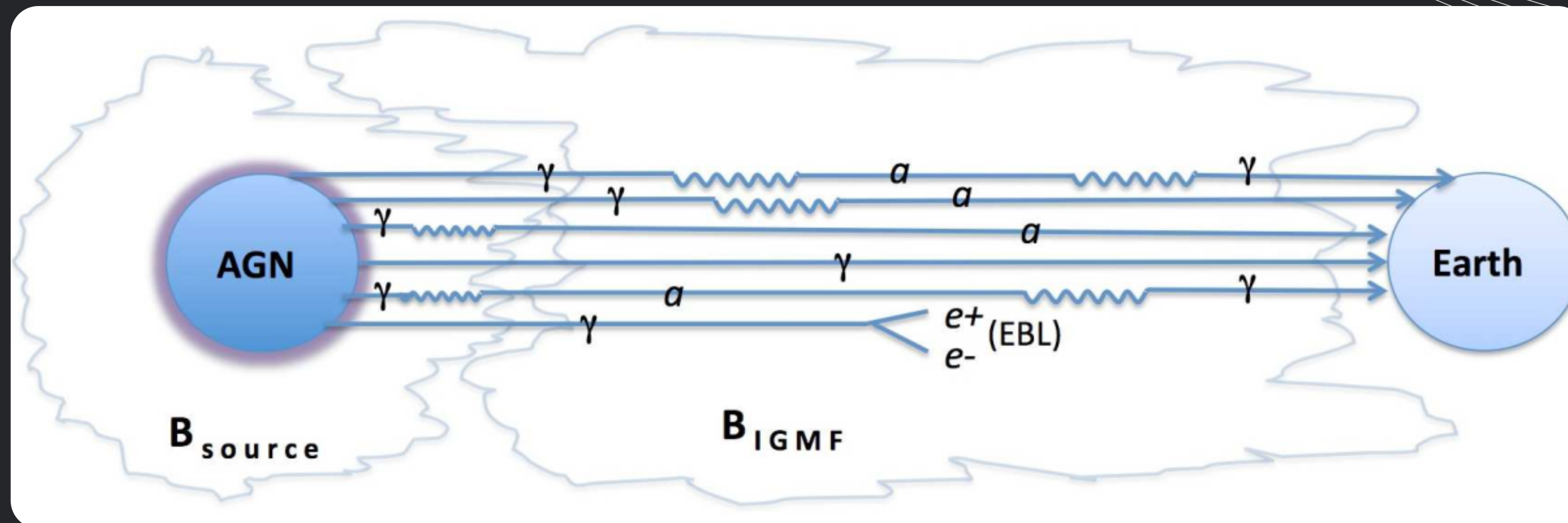


- ALPs apresentam acoplamento com fótons quando sujeitos a campos magnéticos, isto é, podem oscilar entre fótons e ALPs com probabilidade dada por:

$$P_{\gamma a} \simeq \sin^2 \left(\frac{g_{a\gamma} B}{2} z \right)$$

ALPs (Axion-Like Particles)

- Problema da transparência do universo para raios gama de altas energias.



Propagação de raios gama entre a sua fonte e a detecção na terra [5].

É possível encontrar evidências desta oscilação medindo o fluxo de raios gama chegando à Terra!

Cherenkov Telescope Array (CTA)

- Próxima geração de telescópios em solo para a detecção de raios gama de energia muito alta (GeV-TeV);
- Dois sítios de observação nos hemisférios norte e sul, cobrindo todo o céu;
 - Sul: Deserto do Atacama, varrendo o centro plano galáctico e fontes galácticas próximas e detectando eventos entre 20 GeV e 300 TeV;
 - Norte: Ilhas Canárias, sendo menor em tamanho e focando em eventos de energia média-baixa entre 20 GeV e 10 TeV.
- Arranjo de telescópios de diferentes tamanhos: Small-Sized Telescope (SST), Medium-Sized Telescope (MST) e Large-Sized Telescope (LST) para a detecção de radiação Cherenkov emitida por partículas altamente energéticas dos chuviros atmosféricos provocados por raios gama.

Cherenkov Telescope Array (CTA)



Imagem ilustrativa do arranjo de telescópios.

Fonte: www.eso.org

Large-Sized Telescope (LST)

- Diâmetro: 23 m;
- Distância focal 28 m;
- Focaliza radiação Cherenkov em uma câmera de quase duas toneladas com 265 fotomultiplicadoras;
- Captação de eventos de energia mais baixa entre 20 e 150 GeV.

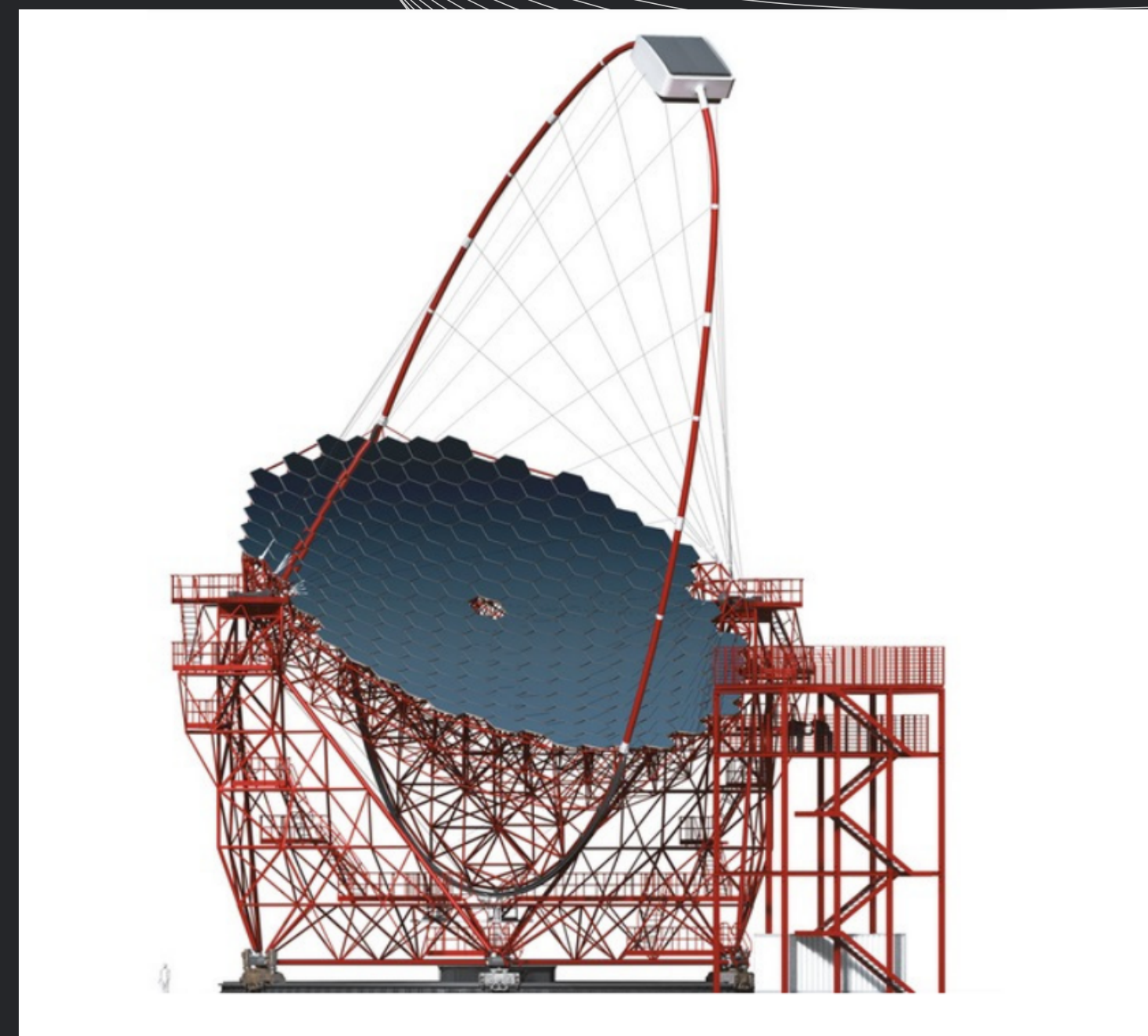


Imagem ilustrativa do LST [6].

Medium-Sized Telescope (MST)

- Diâmetro: 12 m;
- Distância focal: 16 m;
- Focaliza radiação Cherenkov em uma câmera;
- Captação de eventos de energias entre 150 GeV e 10 TeV.

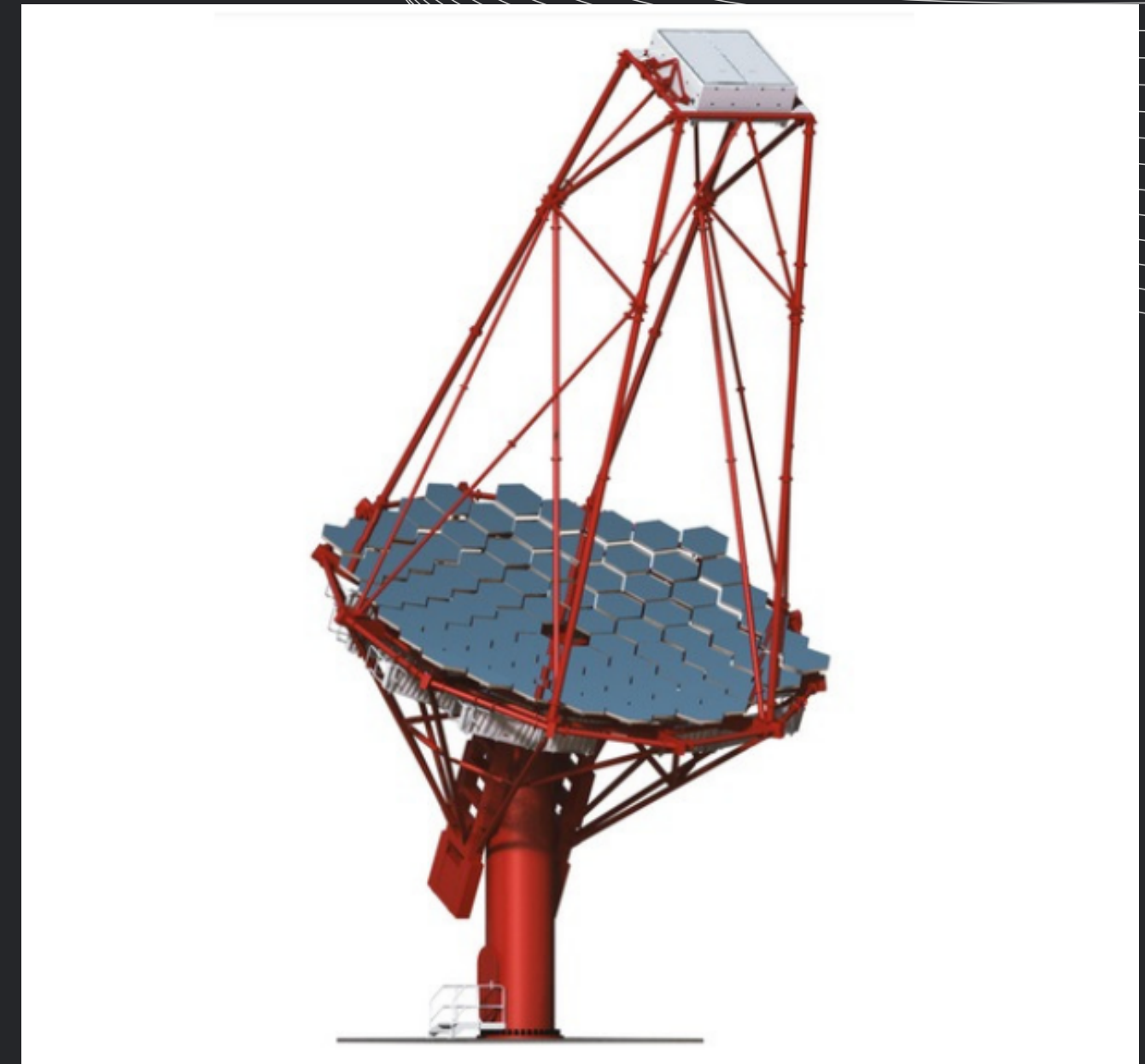


Imagem ilustrativa do MST [6].

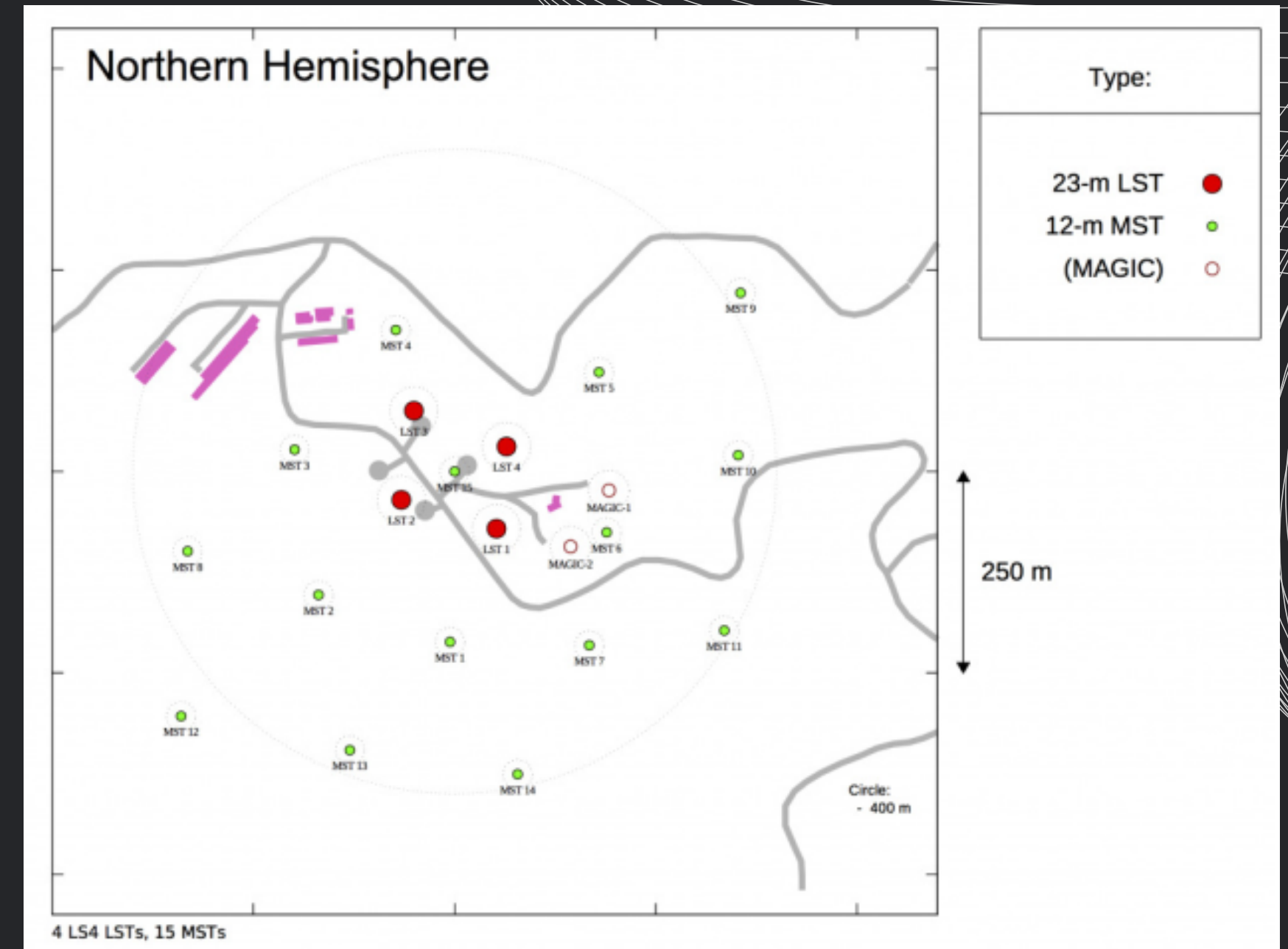
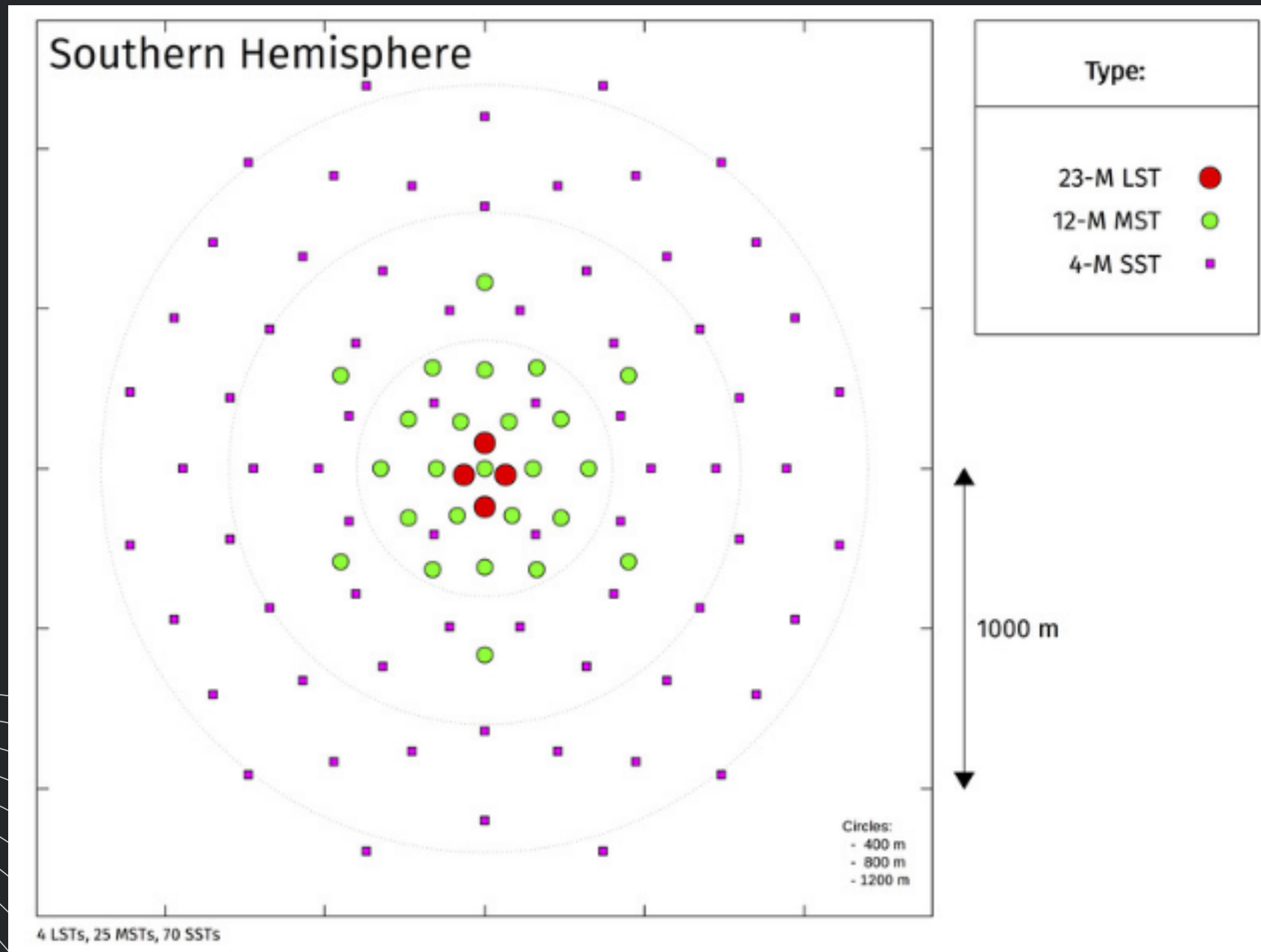
Small-Sized Telescope (SST)

- Três diferentes configurações de espelhos;
- Diâmetros: 4 m - 4,3 m;
- Detecção de eventos de energia mais alta, de alguns TeV a 300 TeV.



Imagem ilustrativa dos SSTs [6].

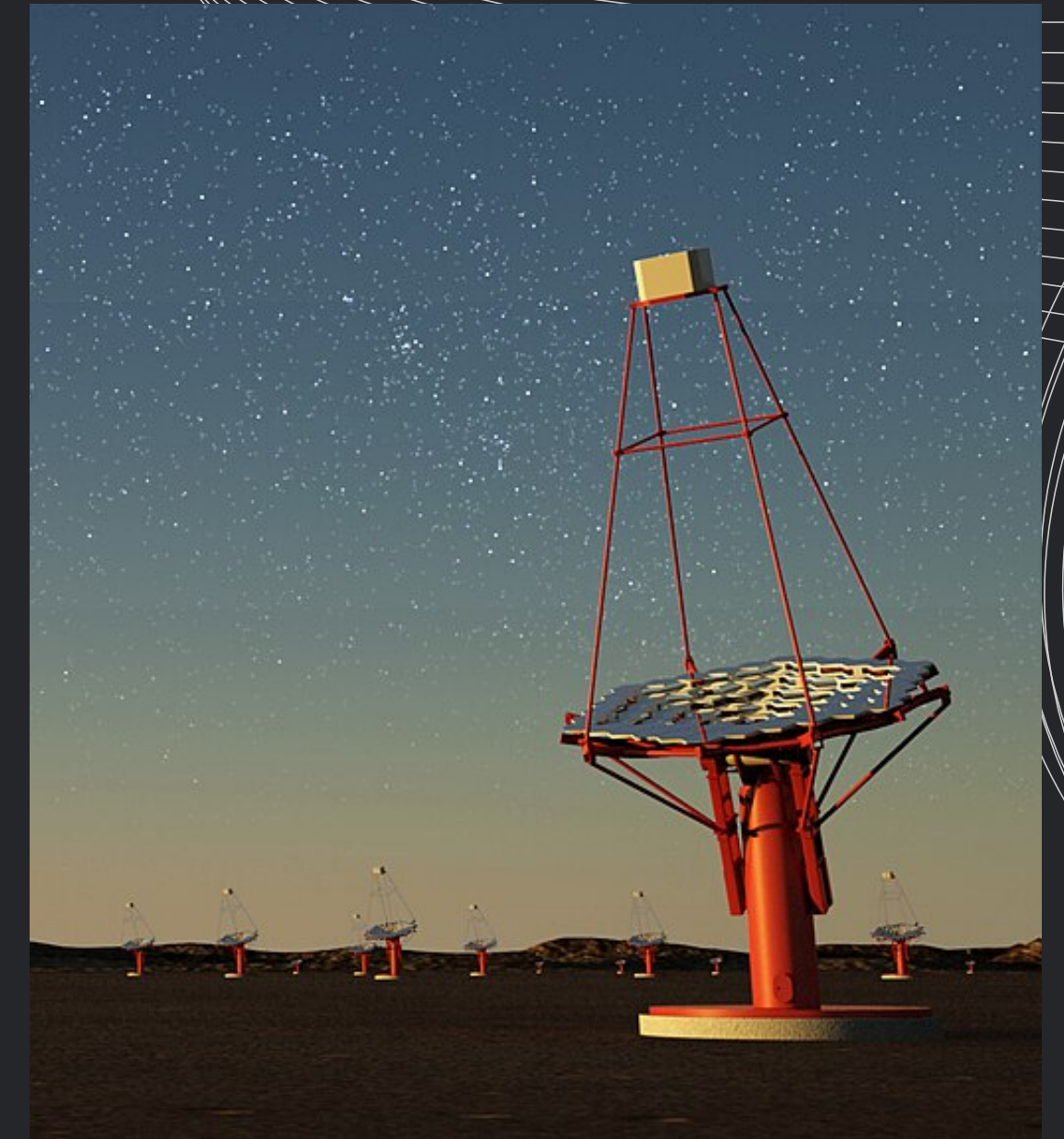
Arranjos



Arranjos de telescópios propostos para o hemisfério sul e norte [6].

Outros objetivos

- **Remanescentes de supernovas:**
 - Aceleração de raios cósmicos;
 - Formação de estrelas em galáxias;
 - Alteração de campos magnéticos.
- **Galáxias com núcleo ativo:**
 - Buraco negro supermassivo com disco de acreção e jatos de partículas relativísticas;
 - Aceleração de raios cósmicos.
- **Regiões de formação de estrelas:**
 - Relacionamento entre partículas altamente energéticas e a formação de estrelas



Fonte: www.cta-observatory.org

Referências

- [1] A. Ahmed. Phenomenological Aspects of Axion-Like Particles in Cosmology and Astrophysics. 2022.
- [2] F. Zwicky. Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln. *Helvetica Physica Acta*, 1933, 6 :110–127.
- [3] V.C. Rubin, V.C. Ford Jr e N. Thonnard. Extended rotation curves of high-luminosity spiral galaxies. IV-Systematic dynamical properties, SA through SC. *The Astrophysical Journal*, 225 :L107–L111, 1978.
- [4] J. H. Christenson et al “Evidence for the 2π Decay of the K_{20} Meson,” *Phys. Rev. Lett.* 13 1964 138.
- [5] M. Doro et al. [CTA Consortium], “Dark Matter and Fundamental Physics with the Cherenkov Telescope Array,” *Astropart. Phys.* 43 (2013) 189.
- [6] Malta, R. Study of axion-like particles signals at the Cherenkov Telescope Array, 2018.