



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE FÍSICA
PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU
ASTROFÍSICA GRAVITACIONAL E FÍSICA ESPACIAL

Emissão anômala de micro-ondas na Via Láctea

JOSÉ RICARDO PEIXOTO DE MELO

BRASÍLIA – DF
2022



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE FÍSICA
PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU
ASTROFÍSICA GRAVITACIONAL E FÍSICA ESPACIAL

Emissão anômala de micro-ondas na Via Láctea

JOSÉ RICARDO PEIXOTO DE MELO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Pós-Graduação Lato Sensu da Universidade de Brasília no Curso de Astrofísica Gravitacional e Física Espacial (AGFE), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Especialista em Física.

Orientador:
Prof. Dr. Thyrso Villela Neto

BRASÍLIA – DF
2022

Melo, José Ricardo Peixoto de.

Emissão anômala de micro-ondas na Via Láctea / José Ricardo Peixoto de Melo. – Brasília, 2022.

41 fls.

Monografia (Especialização) – Universidade de Brasília,
Programa de Pós-Graduação Lato Sensu.

Orientador: Prof. Dr. Thyrso Villela Neto, INPE



Emissão anômala de micro-ondas na Via Láctea

Por: José Ricardo Peixoto de Melo

Comissão avaliadora composta por:

Dr. Thyrso Villela Neto	INPE	Orientador
Dr. César Augusto Costa	INPE	Examinador
Dra. Mariana Penna Lima Vitenti	UnB	Examinadora

BRASÍLIA – DF
2022

“A liberdade é um pré-requisito para continuar a delicada experiência da ciência [...]. Ao mesmo tempo, a ciência – ou melhor, a sua delicada mistura de abertura e ceticismo, e o seu estímulo à diversidade e ao debate – é um pré-requisito para continuar a delicada experiência da liberdade numa sociedade industrial e altamente tecnológica.”

Carl Sagan em *O Mundo Assombrado pelos Demônios*

Agradecimentos

A Deus, pelo dom da vida.

Aos meus pais Heleno (saudades eternas) e Walkiria, que sempre colocaram a educação dos filhos em primeiro lugar.

À minha querida esposa Tetê, que sempre me apoiou e está ao meu lado nos momentos bons ou ruins.

Às minhas filhas queridas, Paula, Penélope e Gabriela, que sempre foram motivos de minha dedicação e de um imenso orgulho. Desculpem-me pelas minhas falhas.

Aos meus familiares e amigos, que sempre estão presentes para alegrar os meus dias.

A todos familiares e amigos, que já não estão presentes entre nós, mas que sempre fizeram diferença em minha vida. Em especial, a meu pai que partiu no ano passado. Um homem bom, de caráter ilibado e sempre dedicado à família. Obrigado por seus ensinamentos. O senhor sempre será lembrado com muito amor.

Ao meu orientador, Professor Thyrso Villela Neto, por sua paciência e dedicação ao ensino e pesquisa que, juntamente com o Professor César Costa, desenvolveram um brilhante trabalho na disciplina de Astrofísica.

Aos professores do curso, que dedicaram seus preciosos tempos para nos brindar com novos conhecimentos, perspectivas e, principalmente, muitos novos questionamentos sobre o Universo. Nossas mentes agradecem.

À coordenadora do curso, Professora Vanessa Carvalho de Andrade, por sua perseverança em não deixar ninguém para trás. Obrigado.

E, finalmente, aos meus companheiros de curso que sempre estiveram ao meu lado para dar forças em todos os momentos de dificuldade. Abraços a todos.

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é apresentar uma revisão sucinta do fenômeno conhecido como Emissão Anômala de Micro-ondas na Via Láctea (AME, da sigla em inglês para *Anomalous Microwave Emission*), que representa um grande desafio para a astrofísica moderna. Desde a primeira detecção dessa emissão, em 1996, até o presente momento, apesar de vários estudos dedicados ao tema, ainda não foi dada uma explicação definitiva sobre a origem e os mecanismos físicos responsáveis por tal emissão. O trabalho está dividido em quatro capítulos. O primeiro é dedicado a um pequeno histórico sobre os avanços tecnológicos na observação do Universo, que proporcionaram a detecção da AME. O segundo capítulo apresenta os três mecanismos de emissão de radiação difusa de rádio frequências e micro-ondas na Galáxia. O terceiro capítulo apresenta alguns estudos que mostram possíveis fontes e mecanismos da AME. E, finalmente, no quarto capítulo são feitas considerações acerca de algumas pesquisas recentes sobre esse tema.

Palavras-chave: Emissão anômala de micro-ondas; emissão de micro-ondas na Galáxia; hidrocarbonetos policíclicos aromáticos; poeira em rotação.

ABSTRACT

The aim of this work is to present a short review of the phenomenon known as Anomalous Microwave Emission (AME) in the Milky Way, which represents an interesting challenge for modern astrophysics. Since the first detection of this emission, in 1996, until now, despite several studies dedicated to the subject, no definite explanation has yet been given about the origin and the physical mechanisms responsible for such emission. This work is divided in four chapters. In the first chapter, it is presented a brief history of the technological advances in the observation of the Universe, which led to the detection of AME. The second chapter presents the three well-known mechanisms responsible for the emission of the diffuse radiation in radio frequencies and microwaves in the Galaxy. The third chapter presents some studies that show possible sources and mechanisms of emission of this type of radiation. And, finally, in the fourth chapter some recent studies about AME are presented.

Keywords: Anomalous Microwave Emission; Galactic Microwave Emission Polycyclic Aromatic Hydrocarbons; Spinning dust.

Lista de Figuras

1. Via Láctea em diferentes comprimentos de onda	pág. 09
2. Janelas atmosféricas em diferentes comprimentos de onda	pág. 10
3. Mapas de detecção do telescópio espacial Planck	pág. 12
4. Interação de um elétron livre com um íon	pág. 15
5. Representação de como o campo magnético galáctico age sobre partículas eletricamente carregadas	pág. 16
6. Exemplo de grão de poeira do meio interestelar	pág. 17
7. Espectros da radiação síncrotron, livre- livre e de poeira	pág. 17
8. Sinais provenientes de fontes terrestres e de diversas fontes extraterrestres detectados por radiotelescópios.....	pág. 18
9. Linhas de absorção do espectro do Sol	pág. 19
10. Comparação entre as linhas de absorção do espectro do Sol e as linhas de emissão do ferro	pág. 19
11. Os diversos espectros eletromagnéticos originados de uma fonte astrofísica	pág. 20
12. O excesso de radiação medido por diversos experimentos levou à descoberta da AME	pág. 21
13. Representação esquemática de um grão de poeira em rotação com momento de dipolo elétrico μ , velocidade angular ω e momento angular L	pág. 22
14. Espectros de emissão de poeira em rotação	pág. 23
15. Exemplos de dois PAH com nitrogênio	pág. 24
16. Espectro de baixa resolução do obtido pelo espectrógrafo de infravermelho IRS	pág. 25
17. Espectros de V892 Tau, MWC 297 e HD 97048	pág. 26
18. Emissividade do dipolo magnético	pág. 28
19. Mapa residual do plano galáctico em 28,5 GHz	pág. 29
20. Espectros de distribuição de energia (SED) de seis regiões HII	pág. 32

Sumário

1	INTRODUÇÃO	09
2	MECANISMOS DE EMISSÃO GALÁCTICA DIFUSA EM RÁDIO FREQUÊNCIAS E MICRO-ONDAS	14
2.1	Emissão Livre-Livre	14
2.2	Emissão Síncroton	15
2.3	Emissão Térmica de Poeira	16
3	EMISSÃO ANÔMALA DE MICRO-ONDAS (AME)	18
3.1	Poeira em rotação (<i>Spinning Dust</i>)	22
3.2	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (PAH)	24
3.3	Nanodiamantes	25
3.4	Dipolos magnéticos	26
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
4.1	Nova luz sobre a AME de grãos de poeira giratórios	29
4.2	Um estudo da AME nas nuvens Galácticas	30
4.3	Investigação da origem da AME em Lambda Orionis	31
4.4	Um primeiro olhar para o COMAP Galactic Plane Survey	31
5	REFERÊNCIAS	34

1. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos dos últimos dois séculos permitiram uma grande revolução na maneira como os seres humanos percebem o Universo. A Figura 1 é um belo exemplo disso e mostra a Via Láctea, a nossa galáxia, observada por diferentes instrumentos que captam diferentes comprimentos de onda (diferentes frequências) emitidos por alguns de seus componentes. É possível perceber que em cada imagem captada em um determinado comprimento de onda são mostrados detalhes que muitas vezes não são visíveis em outros comprimentos de onda (Weaver et al. 2022).

Dessa forma, não mais restritos apenas ao espectro visível, que representa cerca de um centésimo de milésimo de todo o espectro eletromagnético, é possível vasculharmos a imensidão do cosmos e identificar fenômenos e objetos cósmicos exóticos que nos trazem novos desafios e impulsionam os limites do conhecimento humano¹.

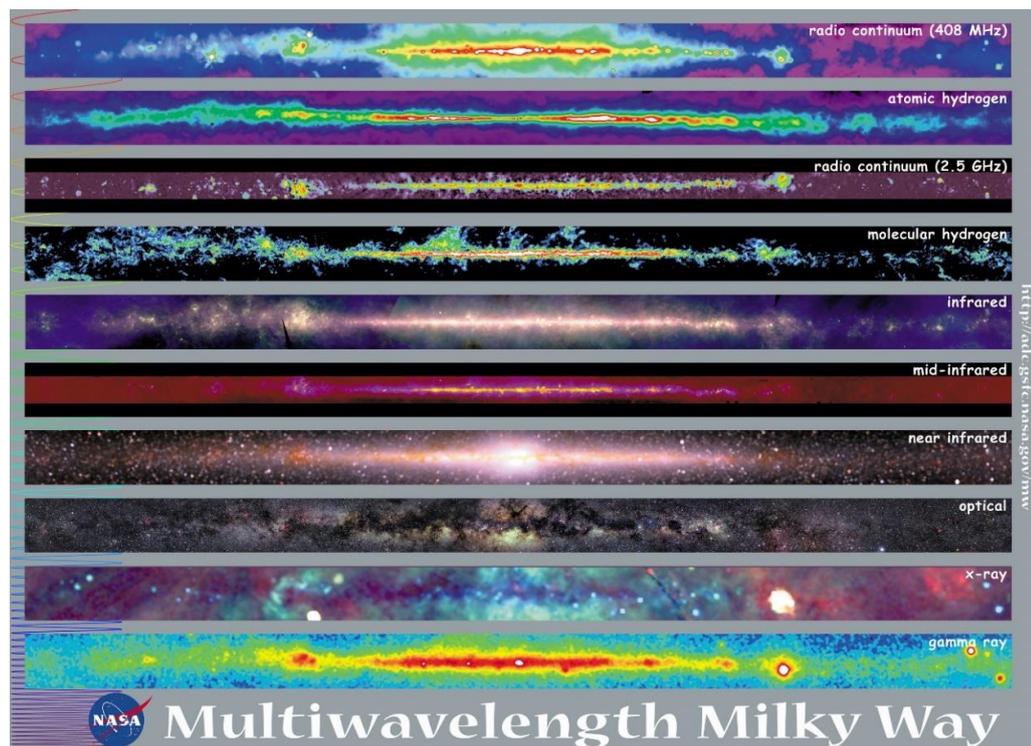


Fig. 1. Imagens da Via Láctea em diferentes comprimentos de onda.

Fonte: NASA/Goddard Space Flight Center: The Multiwavelength Milky Way, 2018. Disponível em: <https://asd.gsfc.nasa.gov/archive/mmw/mmw_sci.html>.

¹ Uma excelente fonte de informações acerca do uso de diferentes comprimentos de onda para o estudo de estruturas do Universo, pode ser consultada em <https://cosmos.astro.caltech.edu/>

Nas imagens mostradas na Figura 1, podemos destacar algumas partes do espectro eletromagnético. Raios gama, raios X e boa parte do espectro infravermelho não são detectados a partir de observatórios que operam no solo, em virtude do bloqueio promovido pela atmosfera da Terra. Assim, tais radiações emitidas por fontes astrofísicas só podem ser detectadas por meio de telescópios espaciais.

Por outro lado, ao analisar a Figura 2, que relaciona a opacidade atmosférica e os comprimentos de onda das radiações do espectro eletromagnético, nota-se uma grande janela de observação na faixa das ondas de rádio e, por esse motivo, radiotelescópios têm sido largamente utilizados para estudos astrofísicos.

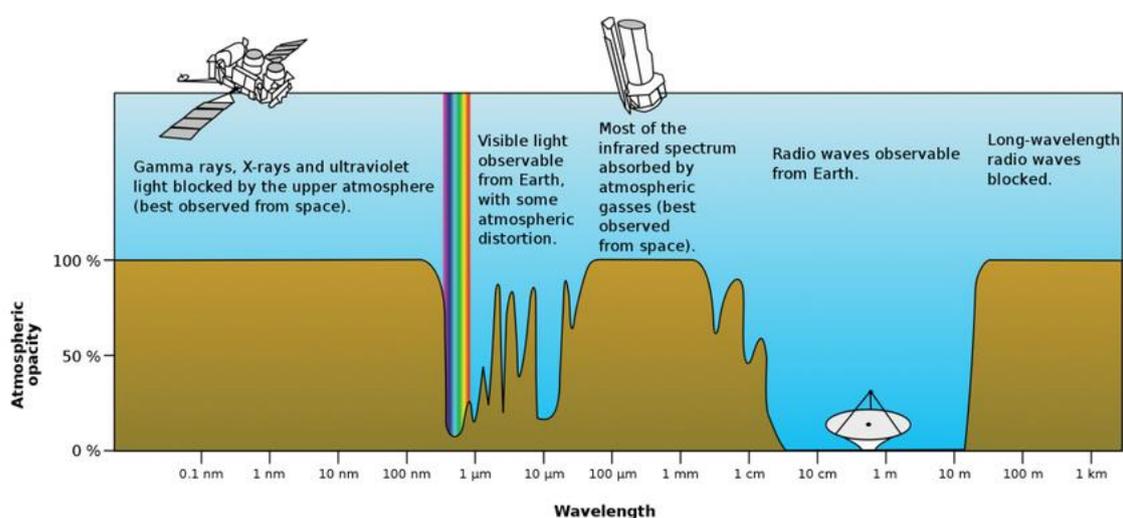


Fig. 2. Janelas atmosféricas em diferentes comprimentos de onda.

Fonte: ASTROPARSEC: O porquê dos observatórios espaciais, 2021. Disponível em: <<https://astroparsec.com/2021/05/19/o-porque-dos-observatorios-espaciais>>.

Como exemplo, vale destacar que há uma previsão para o segundo semestre de 2023 do início das atividades do radiotelescópio BINGO (sigla em inglês para *Baryon acoustic oscillations from Integrated Neutral Gas Observations*) no sertão da Paraíba (Abdalla et al. 2022; Wuensche et al. 2022). Com dois principais objetivos, o BINGO deve detectar a radiação de 21 cm (deslocada para o vermelho), originada na inversão do spin do elétron do hidrogênio neutro (HI), e também a rajadas rápidas de rádio (FRB – sigla em inglês para *Fast Radio Bursts*). A partir dessas observações, pretende-se fazer uma estimativa mais apurada da distribuição da matéria em diversas regiões do cosmo, uma vez que o hidrogênio é o elemento mais abundante do Universo.

Neste contexto de desenvolvimento de novas tecnologias para detecção das radiações emitidas por fontes astrofísicas, a Emissão Anômala de Micro-ondas na Via Láctea (AME, sigla em inglês para *Anomalous Microwave Emission*), representa um desses novos desafios.

A AME foi descoberta (ver Capítulo 3) como um subproduto das observações da Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas (CMB, sigla em inglês para *Cosmic Microwave Background*). Como tais observações exigem medições muito sensíveis, é necessário que sejam removidas quaisquer outras radiações contaminantes que têm suas origens em fontes da Galáxia ou extragalácticas (*foregrounds*). Mas em que consiste a CMB?

A CMB² é um resquício do Universo primordial, quando toda a matéria estava condensada formando um plasma de altíssima densidade e temperatura, em que prótons, elétrons e fótons interagem constantemente, impedindo que os átomos fossem formados, ou seja, matéria e radiação estavam fortemente acopladas.

À medida que o Universo expandiu, a temperatura desse plasma começou a diminuir, aumentando a possibilidade de elétrons livres serem capturados pelos prótons para formar o hidrogênio neutro (recombinação). Com o passar do tempo, o número de elétrons livres diminuiu e a interação entre a matéria formada e a radiação se tornou cada vez menor iniciando uma fase da evolução do Universo conhecida como desacoplamento.

Quando o Universo atingiu cerca 350 mil anos de idade, houve o desacoplamento entre a radiação e a matéria. Essa época é chamada de superfície de último espalhamento. É neste momento da evolução que o Universo se torna transparente para a radiação eletromagnética. Os fótons dessa época, que viajam pelo Universo e que agora chegam até nós, compõem a CMB.

Portanto, a CMB pode ser descrita como um resquício da formação do Universo e o permeia completamente. Já a AME é fruto de um processo de emissão de radiação eletromagnética que tem origem na Via Láctea³.

² Para maiores detalhes acerca da história, investigações experimentais e sua significância para a Cosmologia, consulte o artigo de Durrer 2015.

³ A formação da AME também pode ocorrer em outras galáxias (vide seção 3.2)

Nesse contexto, o telescópio espacial Planck, por meio de seus diversos sensores de detecção de radiações (Planck Collaboration 2006), coletou dados que permitiram produzir dois mapas de detecção em 44,1 GHz, com a CMB presente no mapa superior e com a CMB subtraída no inferior, e mostrados na Figura 3. É possível perceber que a subtração das anisotropias da CMB revela a radiação galáctica difusa fraca em altas latitudes (Dickinson 2018a). A escala de cores foi equalizada no histograma para destacar tanto a emissão mais brilhante quanto a mais fraca. Nota-se que a CMB domina a radiação galáctica difusa em altas latitudes galácticas.

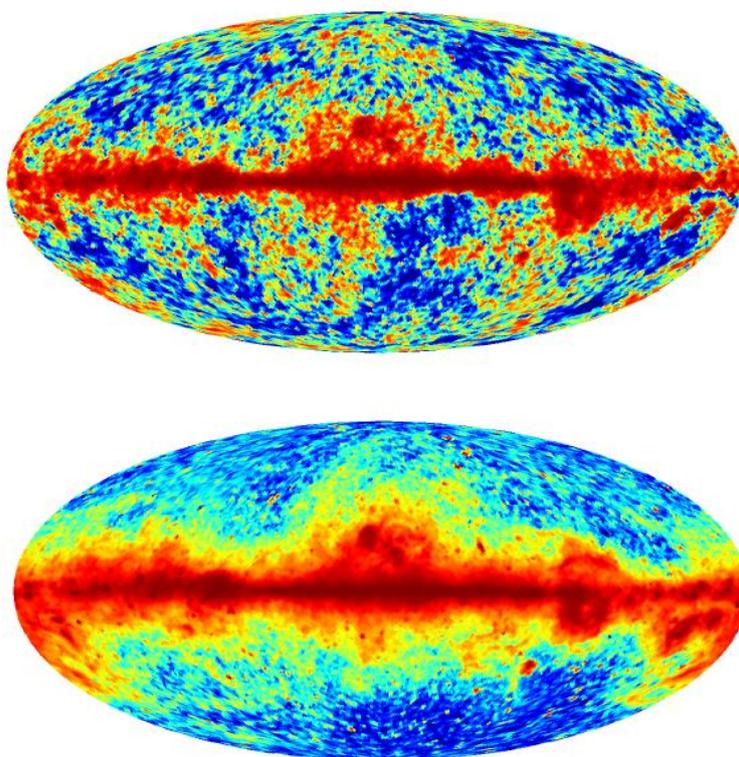


Figura 3 – Mapas de detecção do telescópio espacial Planck. No mapa inferior foi efetuada a subtração da CMB

Fonte: Dickinson 2018a

O mapa inferior da Figura 3, com a CMB subtraída, tem profunda relevância porque mostra a existência de radiações difusas emitidas por fontes que pertencem à Via Láctea e que até o ano de 1996 tinham suas origens e mecanismos de emissão bem conhecidos. Tais radiações são conhecidas como livre-livre, síncroton e térmica de poeira.

Porém, Kogut et al. (1996) e Leitch et al. (1997) perceberam que, ao medir a radiação total emitida pelas fontes da Galáxia, existia um excesso que não poderia ser explicado pelos mecanismos usuais até então conhecidos e o denominaram de emissão anômala de micro-ondas (AME).

O termo anômala, usado para denominar o excesso de emissão observada, pode passar ao leitor como sendo algo que se opõe à ordem natural das coisas, mas o que deve ser entendido é que tal “anomalia” se relaciona com algo novo que foi detectado e que ainda carece de investigações mais profundas para que se determine a natureza daquela radiação observada e não relacionada aos mecanismos até então conhecidos.

Dessa forma, com o objetivo de melhor compreender a AME, e por uma questão didática, serão apresentados os principais mecanismos de emissão difusa de rádio frequências e micro-ondas na Galáxia, seguidos de uma breve discussão sobre as possíveis fontes de emissão da AME e alguns estudos baseados em observações de regiões da Via Láctea.

2. MECANISMOS DE EMISSÃO GALÁCTICA DIFUSA EM RÁDIO FREQUÊNCIAS E MICRO-ONDAS

2.1 EMISSÃO LIVRE-LIVRE

A emissão livre-livre é também conhecida como *Bremsstrahlung*⁴ (do alemão *Bremsen* (frear) mais *Strahlung* (radiação)) e corresponde à emissão de radiação eletromagnética associada geralmente à frenagem (aceleração) que um elétron é submetido quando sujeito a ação de uma força central Coulombiana (de natureza elétrica), sendo a potência irradiada dada por:

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2 \dot{v}^2}{c^3},$$

em que e é a carga elementar, \dot{v} é a aceleração instantânea e c é a velocidade da luz no vácuo.

O Universo contém regiões de plasma (gás ionizado) difuso e quente (da ordem de 10^4 K) que emitem radiação eletromagnética continuamente. Apesar de o somatório das cargas de um plasma por definição ser igual a zero (neutro), há uma grande quantidade de partículas carregadas em constante movimento.

Na Figura 4 é ilustrada a interação de um elétron livre com um íon, tendo o elétron uma energia cinética inicial E_1 e velocidade de módulo v_1 . A força de natureza elétrica provoca um desvio na trajetória do elétron e uma diminuição no módulo da velocidade, que passa a ser v_2 . Conseqüentemente, a energia cinética do elétron diminui e passa a ser E_2 , sendo a energia perdida pelo elétron, $\Delta E = E_1 - E_2$, emitida na forma de radiação eletromagnética com uma determinada frequência $\Delta E = h\nu$, em que h é a constante de Planck e ν é a frequência da radiação.

⁴ A emissão *Bremsstrahlung*, se tratada de forma completa, envolve efeitos quânticos que estão fora do escopo deste trabalho.

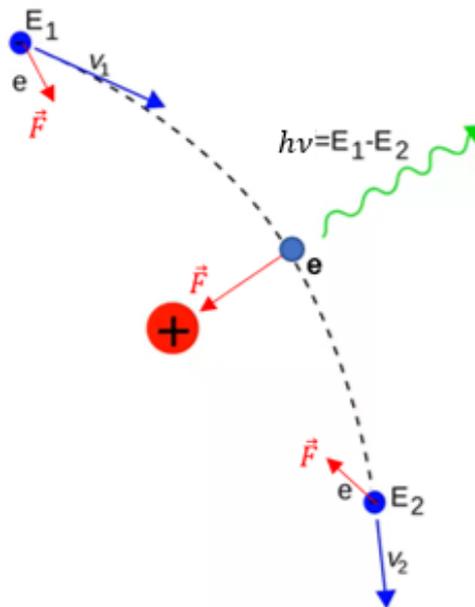


Fig. 4. A interação de um elétron livre com um íon sem que ocorra a captura do elétron é conhecida como *Bremsstrahlung* ou emissão livre-livre.

Fonte: Bremsstrahlung.svg, Wikimedia Commons, 2007. Disponível em: < <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Bremsstrahlung.svg> >.

2.2 EMISSÃO SÍNCROTON

A radiação síncroton é produzida pelo movimento de elétrons relativísticos (que viajam a velocidades próximas à da luz no vácuo) e acabam por espiralar por ação da força magnética de Lorentz. A potência irradiada por um único elétron é dada por:

$$P = 2\sigma_T\beta^2\gamma^2cU_B\sin^2\alpha,$$

em que σ_T é a seção transversal de Thomson, β é a razão entre os quadrados da velocidade do elétron e a velocidade da luz no vácuo, γ é o fator de Lorentz, c é a velocidade da luz no vácuo, U_B é a densidade de energia magnética e α é o ângulo formado entre a direção da velocidade do elétron e o campo magnético.

Na Figura 5 é mostrada a trajetória espiralada percorrida por um elétron que viaja através das linhas de um campo magnético sob ação da força de Lorentz, emitindo radiação síncroton na direção que é perpendicular ao plano da frente de onda formada pelos campos magnético e elétrico, que são variáveis com o tempo.

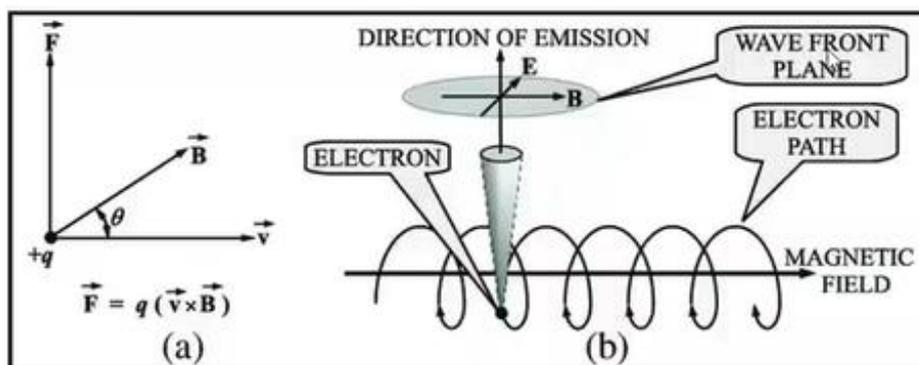


Fig. 5. Representação de como o campo magnético galáctico age sobre partículas eletricamente carregadas e provoca a emissão de radiação síncrotron.

Fonte: RADIO ASTRONOMY AND SUPER-SYNTHESIS: A SURVEY, 2010. Disponível em: <
https://www.researchgate.net/figure/a-Force-on-a-moving-charge-in-a-magnetic-field-b-An-electron-at-relativistic-speed_fig4_228678515 >.

2.3 EMISSÃO TÉRMICA DE POEIRA

O meio interestelar é permeado por poeira que pode ser formada por grafite e silicatos cobertos por uma camada de gelo, também podendo ser formada por outros diferentes tipos de moléculas como os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (PAH), por exemplo.

Parte da radiação eletromagnética estelar que atravessa esse meio difuso de grãos de poeira pode ser absorvida e reemitida em outros comprimentos de onda pelos grãos. A energia absorvida provoca o aumento da temperatura do grão e a maior parte dessa energia absorvida é irradiada em frequências do infravermelho com comprimentos de onda de cerca de 10 μm e, para os grãos frios, a radiação pode atingir picos de cerca de 100 μm . Grande parte dos dados usados para o estudo desse tipo de emissão é oriunda das medidas efetuadas pelo IRAS (*InfraRed Astronomy Satellite*), pelos experimentos FIRAS (*Far Infrared Absolute Spectrophotometer*) e DIRBE (*Diffuse Infrared Background Experiment*) que voaram a bordo do satélite COBE (*COsmic Background Explorer*), e pelos espectrômetros MIRS (*Mid-Infrared Spectrometer*) e NIRS (*Near-Infrared Spectrometer*) do satélite IRTS (*InfraRed Telescope in Space*).

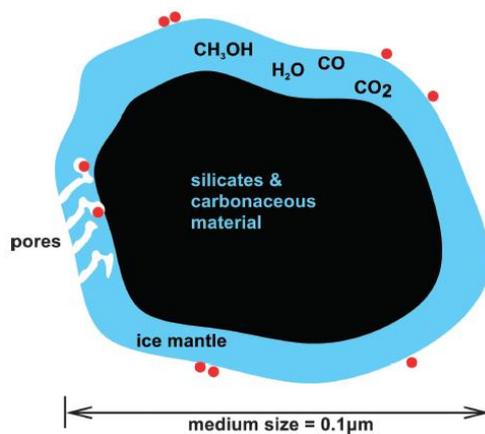


Fig. 6. Exemplo de grão de poeira do meio interestelar.

Fonte: Karssemeijer et al. 2012

Na Figura 7 são mostradas as radiações síncrotron, livre-livre e térmica de poeira, medidas em diversas frequências e latitudes galácticas. De acordo com Bennett et al. (1992), a radiação síncrotron é dominante até cerca de 400 MHz, a radiação livre-livre é dominante até 53 GHz e a emissão térmica de poeira domina a partir de 90 GHz. A borda superior de cada curva sombreada corresponde a latitudes galácticas $15^\circ < |b| < 20^\circ$ e a borda inferior a latitudes $60^\circ < |b| < 70^\circ$. As linhas verticais pontilhadas correspondem às frequências de 0,408; 1,420; 19,2; 31,5; 53 e 90 GHz.

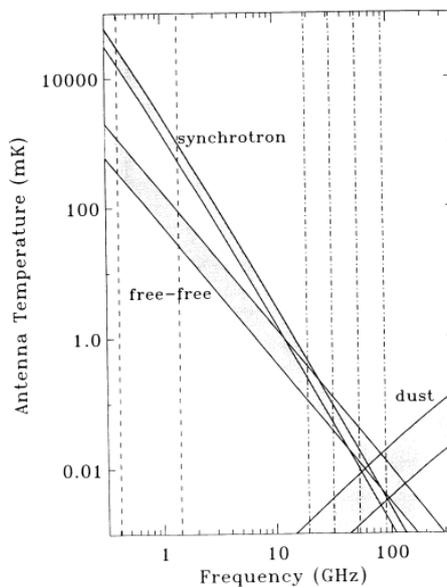


Fig. 7. Espectros da radiação síncrotron, livre- livre e poeira térmica.

Fonte: Bennett et al. 1992.

3. A EMISSÃO ANÔMALA DE MICRO-ONDAS (AME) NA VIA LÁCTEA

Quando um radiotelescópio é apontado para uma determinada região do espaço, é necessário entender que a informação captada pelos sensores nele instalados pode ser composta por uma variedade muito grande de sinais em diferentes frequências (ou comprimentos de onda). Na Figura 8 é mostrada uma miríade de sinais emitidos por diversas fontes, não somente de objetos extraterrestres, mas também aqueles emitidos pela atividade humana.

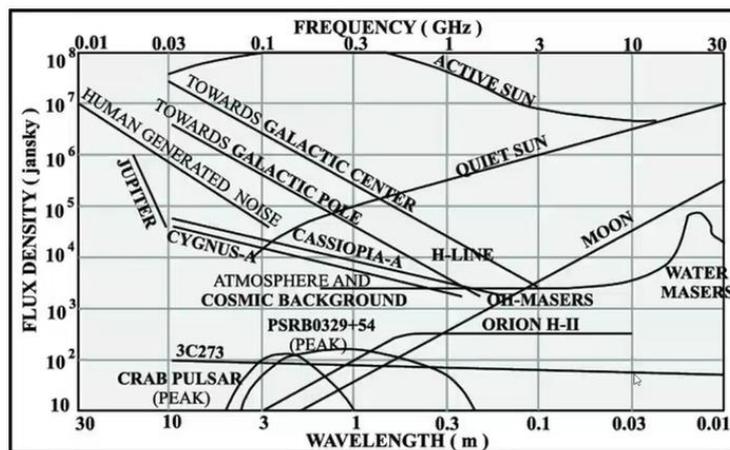


Fig. 8. Sinais provenientes de fontes terrestres e de diversas fontes extraterrestres que são detectados por radiotelescópios.

Fonte: RADIO ASTRONOMY AND SUPER-SYNTHESIS: A SURVEY, 2010. Disponível em: < https://www.researchgate.net/figure/Flux-density-measured-on-Earth-as-a-result-of-radio-emission-from-different-astronomical_fig2_228678515 >.

Desse modo, se faz necessário buscar uma maneira de separá-los por meio de suas respectivas assinaturas espectrais. Para desvendar tais assinaturas, é preciso estudar os espectros eletromagnéticos das fontes observadas, que pode ser contínuo, de emissão ou de absorção.

No início do século XIX o físico alemão Joseph von Fraunhofer observou o espectro da luz solar ao passar por um prisma. Ao expandir aquele espectro colorido, percebeu a presença de uma grande quantidade de linhas negras, que mais tarde seriam batizadas de linhas de absorção (vide Figura 9).

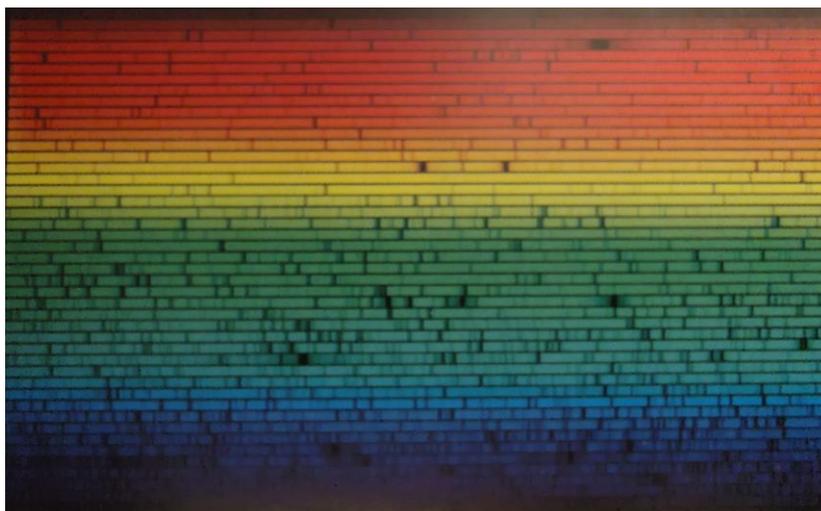


Fig. 9. Linhas de absorção do espectro do Sol.

Fonte: Comins, N. F.; Kaufmann, W. J., Descobrindo o Universo. 8ª edição.

Mais tarde, Robert Bunsen e Gustav Kirchhoff, descobriram que poderiam produzir linhas espectrais em laboratório, ao produzir a queima de pequenas porções de elementos químicos em uma chama de um bico de Bunsen, sendo a luz da chama colorida dirigida para um prisma. Acabaram por descobrir que existia um padrão de linhas espectrais brilhantes que eram únicos para cada elemento que as produzia. Essas linhas espectrais foram chamadas de linhas de emissão e denotavam uma assinatura para cada elemento químico que as emitia.

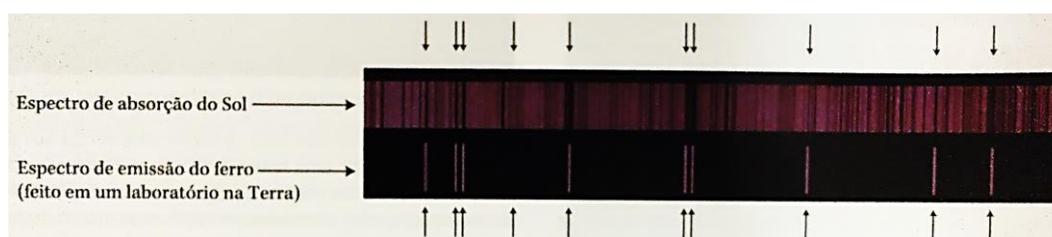


Fig. 10. Comparação entre as linhas de absorção do espectro do Sol e as linha de emissão do ferro produzidas em um laboratório na Terra.

Fonte: Comins, N. F.; Kaufmann, W. J., Descobrindo o Universo. 8ª edição.

Ao comparar as linhas de absorção do espectro solar e as linhas de emissão de um elemento químico, como por exemplo o ferro (Figura 10), percebe-se que as informações de cada um desses espectros são complementares e deduzir que deve existir ferro na atmosfera do Sol. Estava inaugurada a Espectroscopia.

A partir de então se tornou possível fazer uma comparação com as medidas astrofísicas e definir uma assinatura típica da fonte em estudo.

A Figura 11 sintetiza os diversos espectros já discutidos anteriormente e traz a possibilidade de formação de um espectro contínuo por emissão de uma fonte (núcleo estelar) que é detectada diretamente.

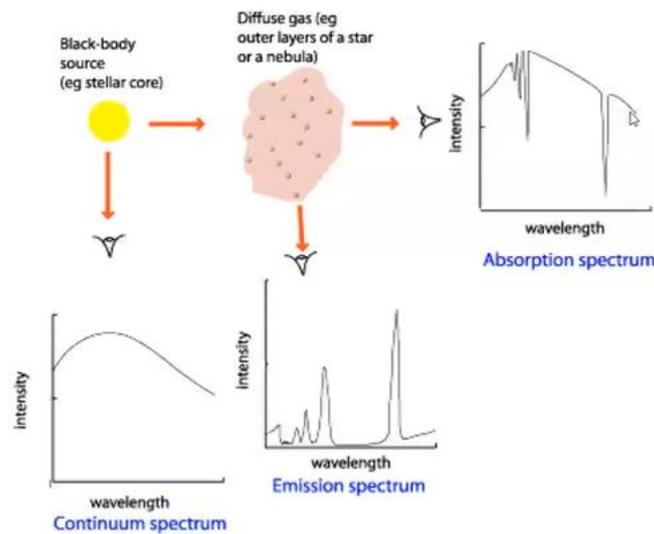


Fig. 11. Os diversos espectros eletromagnéticos originados de uma fonte astrofísica.

Fonte: Types of Astronomical Spectra. Australia Telescope National Facility. Disponível em: < https://www.atnf.csiro.au/outreach//education/senior/astrophysics/spectra_astro_types.html#spectypestar >.

Assim, utilizando as informações coletadas pelos radiotelescópios e conhecidas as respectivas assinaturas espectrais de diversas fontes de radiação, é possível fazer a filtragem dos vários sinais recebidos, o que não significa que seja uma tarefa fácil.

Como visto, existem três mecanismos dominantes no primeiro plano das emissões Galácticas. São eles: a emissão livre-livre de regiões ionizadas, a emissão síncroton gerada por elétrons relativísticos que se movem ao longo do campo magnético da Via Láctea e a emissão térmica por poeira. Porém, desde meados dos anos 1990 esse entendimento começou a ser questionado.

Na Figura 12 são mostradas as relações entre a temperatura de brilho e frequência obtidos para a CMB, a radiação síncroton, a radiação livre-livre e a radiação térmica de poeira obtidas por diversos experimentos, representados pelas faixas verticais em diversas cores. A partir desse gráfico é possível perceber que nas faixas de frequência estudadas há um excesso no total de

radiação medida, ou seja, há uma radiação até então desconhecida, que foi primeiramente percebida por Kogut et al. (1996) e Leitch et al. (1997). A partir de então, essa emissão ficou conhecida como Emissão Anômala de Micro-ondas ou, como definida anteriormente, AME.

Kogut et al. (1996) e de Oliveira-Costa et al. (1997), por exemplo, ao investigarem cuidadosamente a CMB, encontraram uma boa correlação entre as micro-ondas e o infravermelho distante (FIR, sigla em inglês para *Far InfraRed*) em grandes escalas angulares, dando continuidade aos estudos sobre esse fenômeno.

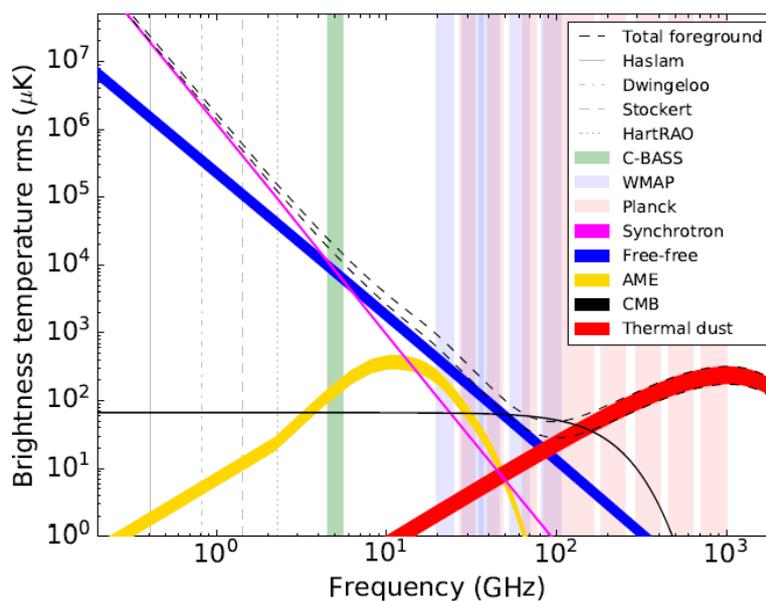


Fig. 12. O excesso de radiação medido por diversos experimentos levou a descoberta da AME.

Fonte: Jones et al. 2018.

A AME é um componente das radiações difusas da Galáxia e é observada aproximadamente em uma faixa de frequências compreendida entre 10 a 60 GHz. Desde sua detecção e comprovação como um componente da emissão Galáctica, a AME tem sido estudada por uma variedade de experimentos e em diversos ambientes da Galáxia e correlacionada espacialmente com o infravermelho distante da emissão de térmica de poeira. Ela, no entanto, não pode ser explicada pelos mecanismos de emissão síncroton ou livre-livre e está muito acima da contribuição de emissão térmica de poeira.

A questão subsequente à descoberta da AME está relacionada com sua origem. Qual é a fonte, ou fontes, de emissão dessa radiação e quais são os respectivos mecanismos físicos responsáveis por essa emissão?

3.1 Poeira em rotação (*Spinning Dust*)

A primeira possível resposta para explicar essa emissão anômala de radiação eletromagnética em micro-ondas pode ser o mecanismo formulado por Erickson (1957), em que a emissão de radiação seria proveniente de grãos de poeira ultrapequenos (podendo ser do tamanho de uma centena de átomos) com momento de dipolo elétrico ou magnético em rotação.

Para exemplificar (ver Dickinson et al. 2018b), considere um grão de poeira com momento de dipolo elétrico permanente, girando com uma frequência angular ω , que produzirá uma emissão de acordo com a fórmula de Larmor:

$$P = \frac{2}{3} \frac{\omega^4 \mu^2 \sin^2 \theta}{c^3},$$

em que P é a potência total emitida com uma frequência $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$ e θ é o ângulo formado entre ω e μ , conforme mostrado na Figura 13.

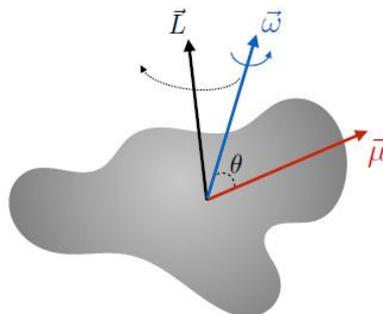


Fig. 13. Representação esquemática de um grão de poeira em rotação com momento de dipolo elétrico μ , velocidade angular ω e momento angular L .

Fonte: Dickinson et al. 2018b.

Obviamente, no meio interestelar não existe apenas um grão de poeira, portanto, há que se considerar que o espectro de emissão é dependente da distribuição das frequências de rotação e dos momentos de dipolo dos inúmeros grãos. Desta forma, vários modelos teóricos foram produzidos com o intuito de

calcular as razões de distribuições de rotações, dos tamanhos dos grãos e das composições que se encaixam nas medições realizadas.

Na Figura 14 são mostrados espectros de emissão de poeira em rotação previstos por Ali-Haïmoud et al. (2009) para diversos meios ambientes, sendo: meio neutro frio (CNM, sigla em inglês para *Cold Neutral Medium*), meio neutro quente (WNM, sigla em inglês para *Warm Neutral Medium*), meio ionizado quente (WIM, sigla em inglês para *Warm Ionized Medium*), nuvem molecular (MC, sigla em inglês para *Molecular Cloud*), nuvem escura (DC, sigla em inglês para *Dark Cloud*) e nebulosa de reflexão (RN, sigla em inglês para *Reflection Nebula*)

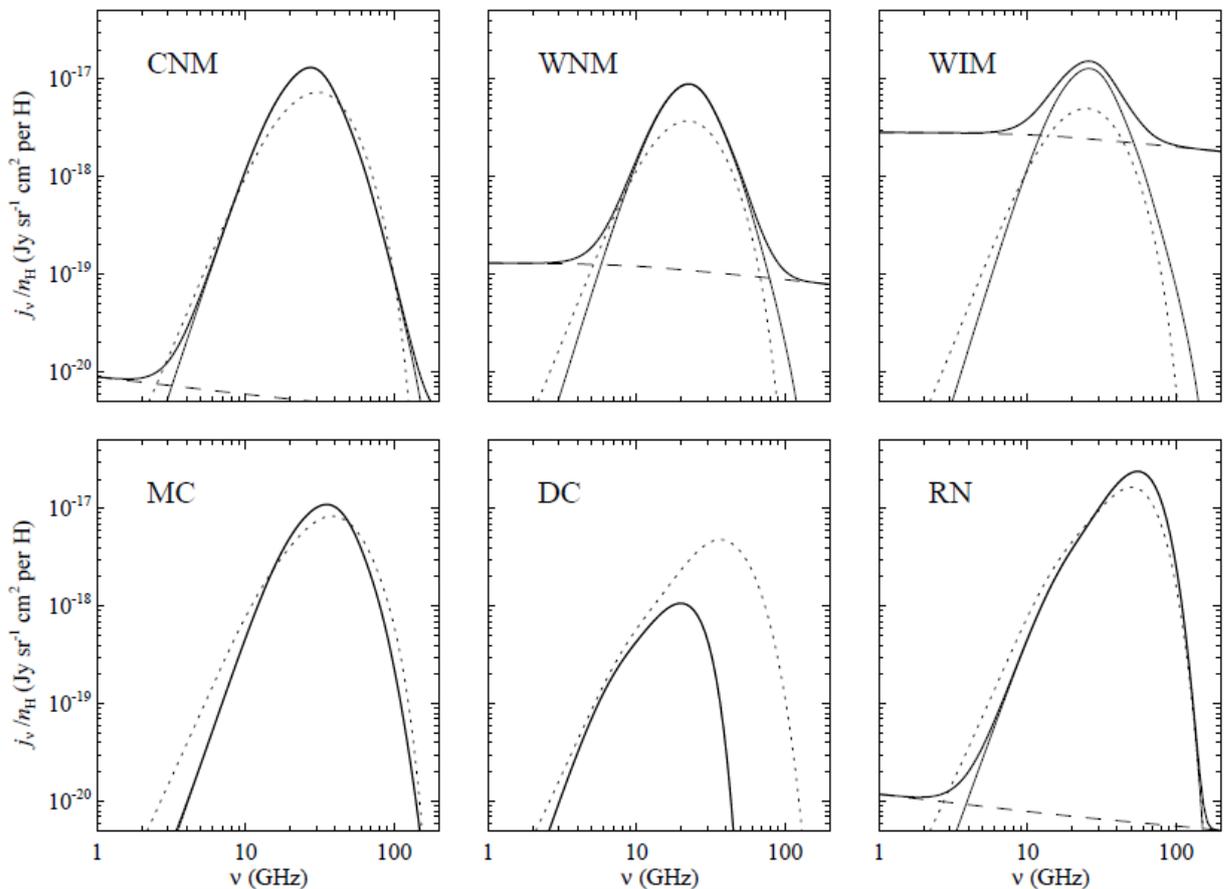


Fig. 14. Espectros de emissão de poeira em rotação. A linha sólida é o resultado dos cálculos de Ali-Haïmoud et al. (2009), a linha pontilhada é a previsão dada por Draine e Lazarian (1998) e a linha tracejada representa a emissão livre-livre.

Fonte: Ali-Haïmoud et al. 2009.

Alguns trabalhos, como os de Ysard e Verstraete (2010), Tibbs et al. (2011) e Hensley et al. (2016), utilizando dados do *Spitzer Space Telescope* (SST), do satélite *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP), dos últimos mapas de céu inteiro (*all-sky maps*) do satélite Planck e de vários radiotelescópios terrestres, apontam uma forte relação entre a emissão de poeira em rotação e a AME.

3.2 Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos

Por outro lado, Draine e Lazarian (1998) propuseram que hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAH, da sigla em inglês para *Polycyclic Aromatic Hydrocarbon*) poderiam, em rotação, gerar as emissões correspondentes à AME.

Tielens (2013), Ali-Haïmoud (2014) e Andrews et al. (2015) argumentam que poucas espécies seriam altamente estáveis e resistentes às condições adversas do meio interestelar. Foram usados nesses estudos dados de infravermelho que sugerem que um número limitado de PAH altamente compactos e simétricos poderia dominar a família de PAH interestelar, sendo chamados de “grandPAH”.

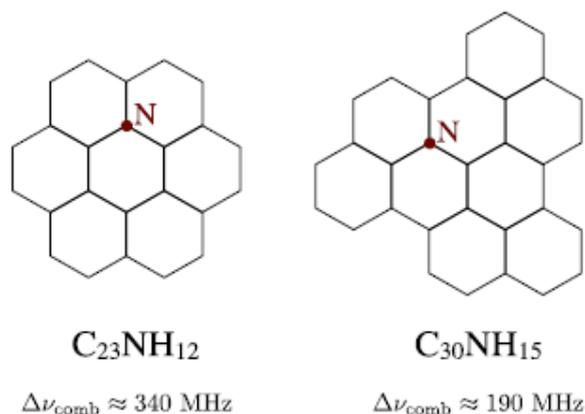


Fig. 15. Exemplos de dois PAHs com nitrogênio. Essas moléculas são alvo de pesquisas sobre AME.

Fonte: Dickinson et al. 2018b.

O espectro de baixa resolução, apresentado na Figura 16, foi obtido pelo espectrógrafo de infravermelho (IRS, sigla em inglês para *Infrared Spectrograph*) a bordo do Telescópio Espacial Spitzer, proveniente da região LMC HII MSX

1306, pertencente à Grande Nuvem de Magalhães⁵ (LMC, sigla em inglês para Large Magellanic Cloud). Características proeminentes de PAH e linhas de emissão atômica/molecular são visíveis e indicados nos rótulos da parte superior do gráfico e os três platôs são identificados abaixo das bandas de emissão de PAH (região sombreada em verde).

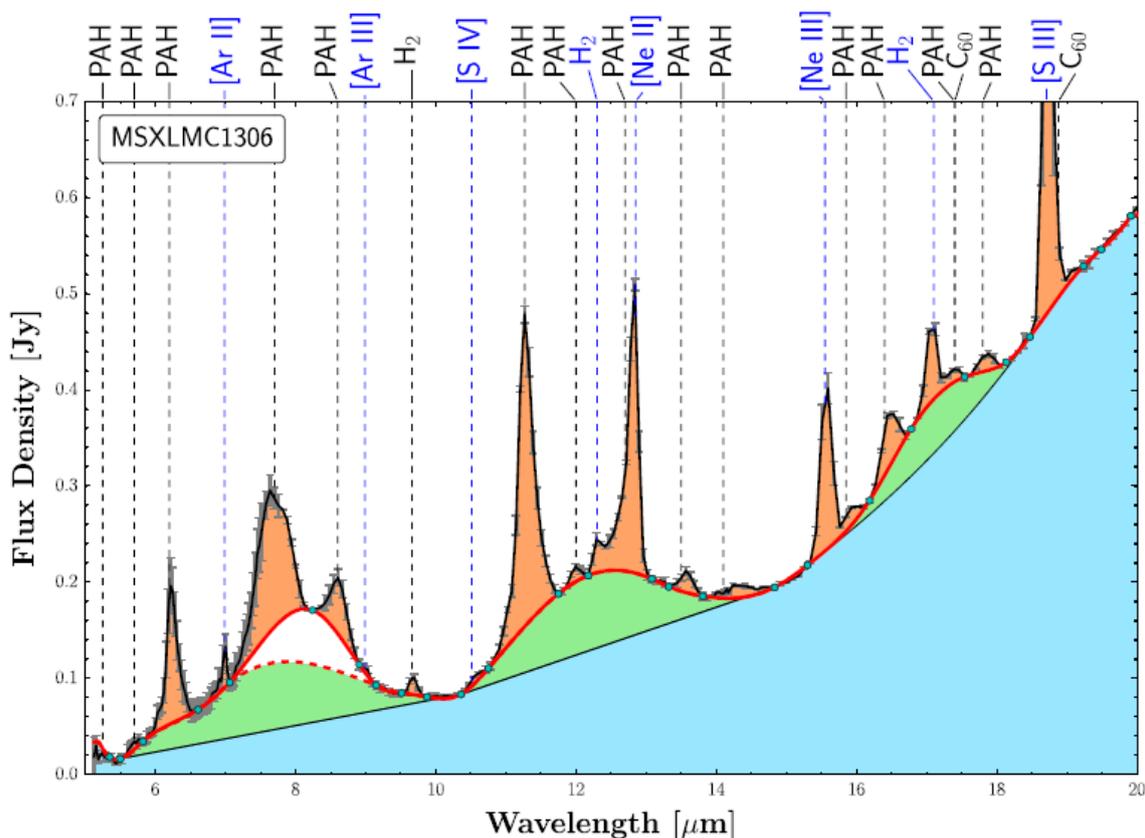


Fig. 16. Espectro de baixa resolução do obtido pelo espectrógrafo de infravermelho IRS, proveniente da região LMC HII MSX 1306.

Fonte: Shannon, M. J. et al. 2015

3.3 Nanodiamantes

Em outro estudo, Greaves et al. (2018) identificaram emissões anômalas de micro-ondas em três discos protoplanetários, sendo esses os únicos sistemas conhecidos que hospedam nanodiamantes hidrogenados, em

⁵ A Grande Nuvem de Magalhães é uma das cerca de 40 galáxias satélites pertencentes ao Grupo Local, onde a Via Láctea e a galáxia de Andrômeda são maiores e mais massivas. O presente trabalho se restringe às emissões difusas na Via Láctea, mas há evidências que emissões semelhantes ocorrem em outras galáxias.

que as ligações C-H podem fornecer os momentos de dipolo elétrico adequados. Por meio de espectroscopia, foi possível detectar nanodiamantes próximos às estrelas hospedeiras.

Na Figura 17 são mostrados os espectros obtidos pelo Espectrômetro de comprimento de onda curto (SWS, sigla em inglês para Short Wavelength Spectrometer) do Observatório Espacial de Infravermelho (ISO, sigla em inglês para Infrared Space Observatory) para os três discos estelares de V892 Tau, MWC 297 e HD 97048 que hospedam nanodiamantes. Para maior clareza, os dados V892 Tau foram agrupados em quatro canais espectrais de 0,3 nm e 60 Jy foram subtraídos em toda a banda para MWC 297. Os comprimentos de onda do pico de emissão dos nanodiamantes variam em aproximadamente ± 1 nm. Embora isso esteja próximo do limite da resolução espectral do instrumento, essas mudanças podem indicar diferenças de temperatura de aproximadamente 100 K, dentro da faixa de 800 a 1400 K onde os nanodiamantes hidrogenados são estáveis.

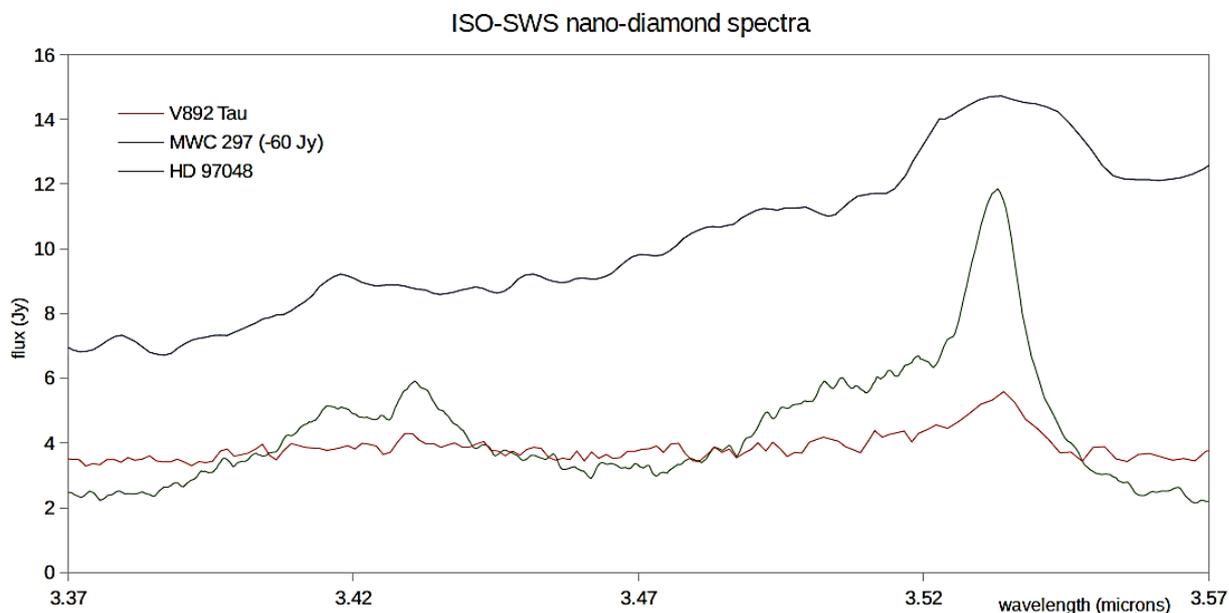


Fig. 17. Espectros de V892 Tau, MWC 297 e HD 97048 identificam emissões compatíveis com as emissões de nanodiamantes.

Fonte: Greaves et al. 2018

Com o desenvolvimento de modelos de discos circunstelares, a AME foi reproduzida com nanodiamantes de 0,75 a 1,1 nanômetros de raio. Como as taxas de luminosidade estelar são aproximadamente constantes, é possível que os nanodiamantes sejam onipresentes em muitos sistemas estelares, mas emitam radiação abaixo dos limiares de detecção. Isso pode ser de especial interesse, já que pode haver uma conexão com as descobertas de nanodiamantes encontrados em meteoritos do Sistema Solar.

Essas partículas podem ter sido formadas em condições de grande pressão, colisões ou por deposição de vapor interna ou externamente à nebulosa protossolar (Hueso e Guillot 2003). Como a absorção espectral do nanodiamante é vista em linhas de visada interestelares, essas nanopartículas acabam por ser candidatas a gerar AME em escala galáctica, diferentemente do que ocorre com os PAH.

3.4 Dipolos Magnéticos

Além das hipóteses já relatadas, há a possibilidade de serem encontrados grãos de poeira impregnados de ferro, tal como comumente encontrados em meteoritos de ferro e níquel, na forma de ferro metálico (Fe), óxido férrico (Fe_2O_3) ou hematita (Fe_3O_4). Tais materiais são suscetíveis à magnetização espontânea pelo alinhamento natural dos spins dos elétrons, ou seja, mesmo que não exista um campo magnético externo pode ocorrer o emparelhamento dos spins.

Variações de temperatura podem provocar mudanças na magnetização dos materiais, variando seus estados entre aquele de mínima energia e o estado excitado. É justamente nesse processo de excitação e relaxamento, provocado pela flutuação térmica, que ocorre a emissão de radiação. Cabe notar que o processo aqui descrito é puramente térmico e se diferencia da emissão de poeira em rotação.

A emissividade do dipolo magnético para cada componente do grão é mostrada na Figura 18. Estudos sensíveis do brilho do céu de micro-ondas revelaram a emissão de micro-ondas da matéria interestelar; a emissividade por núcleo de H foi deduzida da correlação cruzada do brilho do céu de micro-ondas com a emissão de infravermelho distante (FIR) de grãos de poeira, usando

medições do COBE DMR (Kogut et al. 1996), o experimento terrestre Saskatoon (de Oliveira-Costa et al. 1997), e Owens Valley Radio Observatory (Leitch et al. 1997).

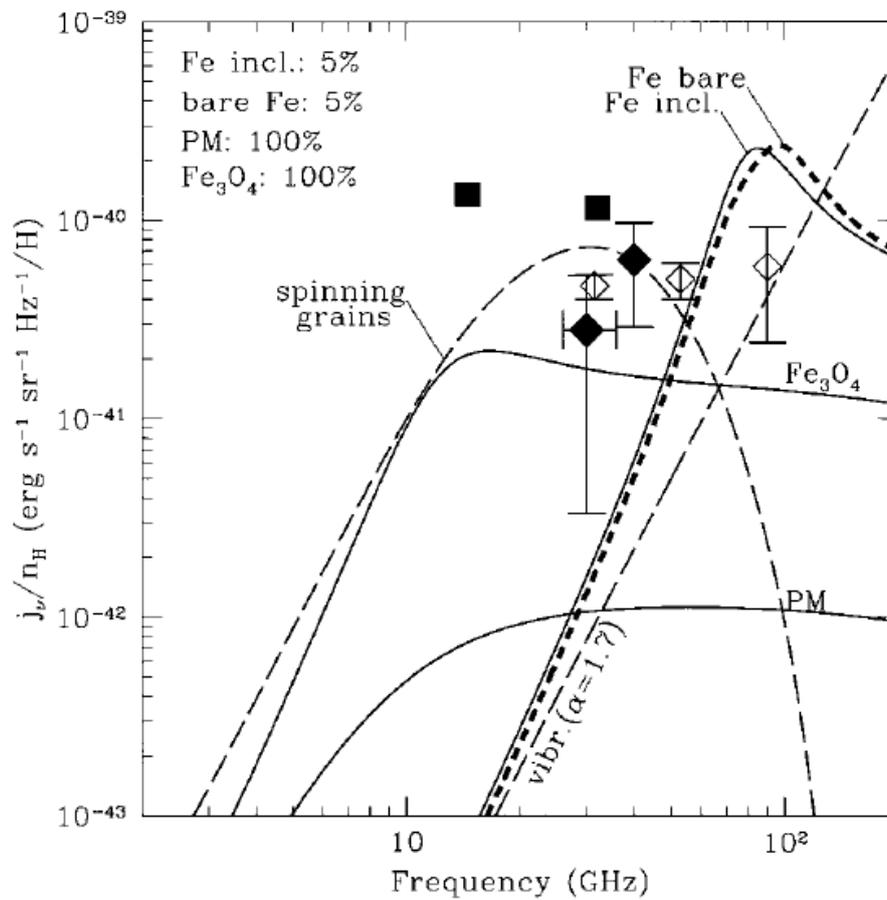


Fig. 18. Emissividade do dipolo magnético para cada componente do grão. As emissividades observadas são inferidas a partir dos dados de Kogut et al. 1996 (losangos abertos), de Oliveira-Costa et al. 1997 (diamantes cheios), e Leitch et al. 1997 (quadrados preenchidos).

Fonte: Draine e Lazarian 1999

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma vez apresentadas as principais fontes e mecanismos teóricos que buscam explicar a origem da AME, vamos relatar alguns estudos que analisam os dados coletados de diversas regiões que são candidatas à emissoras de AME.

4.1 Nova luz sobre a AME de grãos de poeira giratórios

Desde as primeiras detecções de micro-ondas, a AME se tornou uma emissão característica da Via Láctea (Dickinson et al. 2013; Dickinson et al. 2018b). Esta afirmação pode ser confirmada por meio da análise detalhada dos dados do satélite Planck, os quais mostram um excesso de emissão do tipo AME próxima de 30 GHz ao longo do Plano Galáctico (Planck Collaboration 2011).

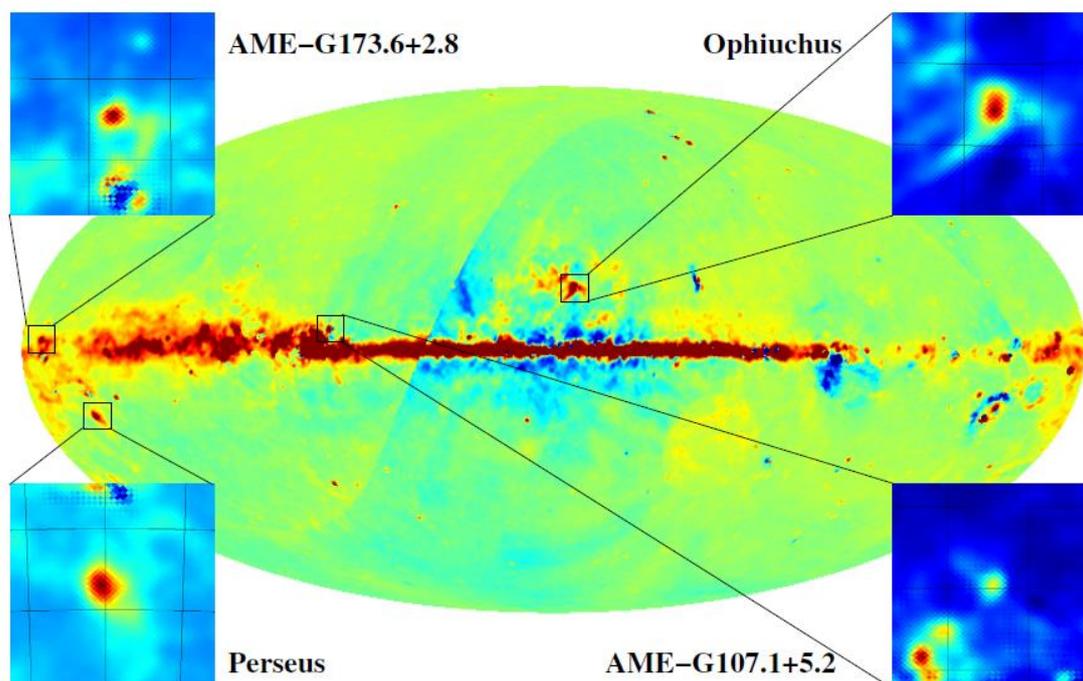


Fig. 19. Mapa do Plano Galáctico em 28,5 GHz.

Fonte: Planck Collaboration (2011).

No mapa da Figura 19, extraído de Planck Collaboration (2011), são mostrados os resíduos de observação do Plano Galáctico após a subtração das

emissões síncrotron, livre-livre e de poeira. Nos destaques são identificadas mostram as regiões de nuvens moleculares de Perseus e ρ Ophiuchi e duas novas regiões de AME, que mostram um excesso de emissão na faixa de 20 a 60 GHz.

Com os dados dos mapas do satélite Planck e de dados auxiliares multifrequenciais, foram construídos espectros para duas regiões emissoras AME conhecidas como as nuvens moleculares de *Perseus* e de ρ *Ophiuchi*. Os espectros são bem ajustados por uma combinação de radiação livre, radiação cósmica de fundo, poeira térmica e radiação de dipolo elétrico de pequenos grãos de poeira giratórios. Os espectros têm um pico na faixa de 20 a 40 GHz e são detectados em altas significâncias em ambas regiões.

Também foram pesquisadas outras regiões candidatas emissoras de AME, subtraindo as radiações síncrotron, livre-livre e poeira térmica. Foram apresentados espectros para dois dos candidatos; AME-G107.1+5.2 e AME-G173.6+2.8 que são regiões HII (hidrogênio ionizado) brilhantes que mostram evidências de AME e são bem ajustadas ao modelo de poeira giratória.

Dessa forma, as observações favorecem fortemente o mecanismo da poeira giratória (radiação de dipolo elétrico).

4.2 Um estudo da AME nas nuvens Galácticas

Em Planck Collaboration (2014) foi realizado um estudo estatístico das propriedades básicas das regiões AME e do ambiente em que elas emitem. Foram utilizados diversos mapas dos satélites WMAP e Planck, combinados com dados auxiliares de rádio e infravermelho (IR) objetivando construir uma amostra de 98 fontes candidatas a emissoras de AME.

Para as fontes candidatas, foram criados espectros de distribuição de energia (SED, sigla em inglês para *Spectral Energy Distribution*), sendo cada espectro comparado com um modelo simples de componentes de emissões livre-livre, síncrotron, CMB, poeira e poeira giratória.

Das 98 fontes, 42 apresentaram excesso de emissão significativo em frequências entre 20 e 60 GHz. Uma análise da contribuição potencial da

emissão livre-livre opticamente espessa de regiões HII ultracompactas, usando critérios de cor IR, reduziu a amostra significativa de AME para 27 regiões, sendo que os espectros de AME para essas regiões foram consistentes com os espectros do modelo de poeira giratória. As frequências de pico observadas estão na faixa de 20 a 35 GHz, exceto para a nebulosa da Califórnia (NGC1499), que parece ter uma alta frequência de pico de poeira giratória de (50 ± 17) GHz.

4.3 Investigação da origem da AME em Lambda Orionis

Bell et al. (2019) investigaram a AME na região de Lambda Orionis (λ Orionis) utilizando principalmente os dados da câmera de infravermelho (IRC) do satélite AKARI, que têm uma cobertura completa da banda das emissões de PAH e também das emissões em infravermelho médio (MIR) e infravermelho distante (FIR). Os dados foram comparados com aqueles obtidos por Planck Collaboration (2014) para λ Orionis em escala angular de aproximadamente 1° .

A partir dos dados obtidos, chegou-se à conclusão de que a massa de poeira em λ Orionis certamente está relacionada com a AME e que a emissão na banda de $9 \mu\text{m}$ (AKARI/IRC) correlaciona-se um pouco mais fortemente com PAH. Usando inferência Bayesiana hierárquica e modelagem de distribuição de energia espectral total, foi argumentado que a AME em λ Orionis se correlaciona mais fortemente com a massa de PAH do que com a massa total de poeira, dando suporte para uma hipótese giratória de PAH nessa região.

4.4 Um primeiro olhar para o COMAP Galactic Plane Survey

Rennie et al. (2022) apresentaram os primeiros resultados do COMAP *Galactic Plane Survey*, realizado entre junho de 2019 e abril de 2021, abrangendo a faixa compreendida entre $20^\circ < \ell < 40^\circ$ e $|b| < 1,5^\circ$, com uma resolução angular de $4,5'$. Os resultados iniciais da primeira parte dessa pesquisa incluem emissões difusas e SED de regiões HII e restos de supernovas. Usando dados de baixa e alta frequências para restringir as contribuições de emissão livre-livre e térmica de poeira, foram encontradas

evidências de excesso de densidade de fluxo em 30 GHz em seis regiões, que foram interpretadas como AME e estão mostradas na Figura 20.

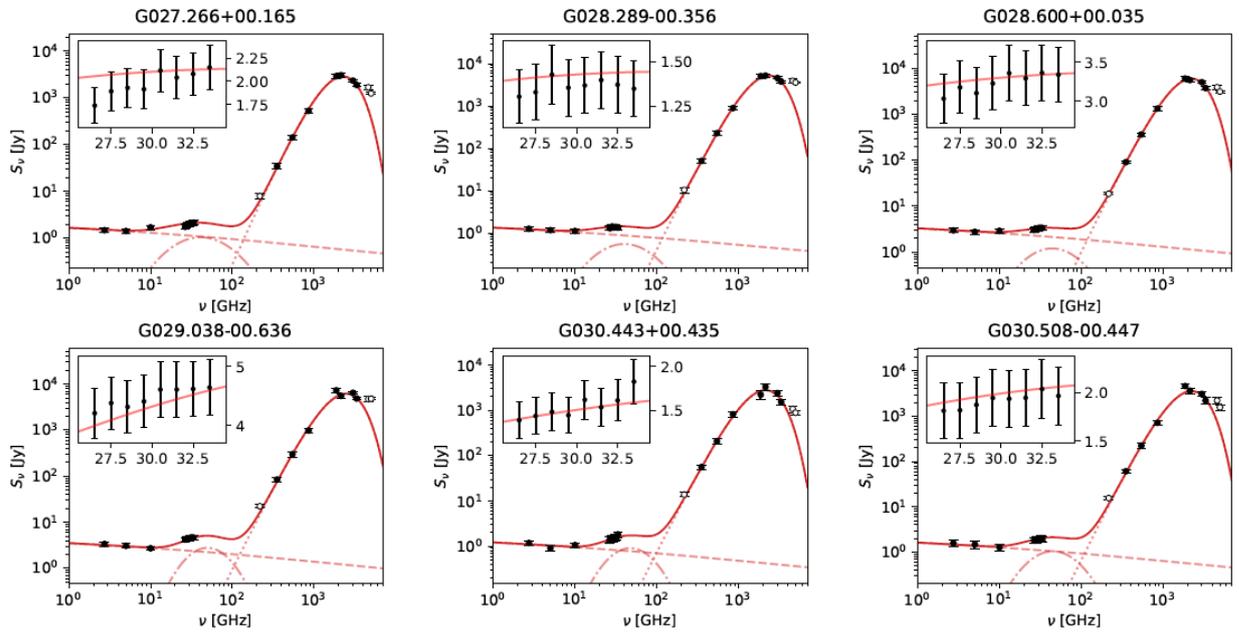


Fig. 20. Espectros de distribuição de energia (SED) de seis regiões HII. Os círculos preenchidos são usados no ajuste, enquanto os círculos abertos não foram utilizados. As componentes livre-livre, poeira giratória e poeira são mostradas como linha tracejada, linha tracejada-pontilhada e pontilhada, respectivamente. O modelo de emissão total é mostrado como a linha vermelha grossa. O recorte mostrado no canto superior esquerdo de todos os gráficos mostra o espectro da banda de 26 a 34 GHz.

Fonte: Rennie et al. (2022).

Considerando que o COMAP *Galactic Plane Survey* é um estudo recente e em andamento, os primeiros dados coletados e analisados representam uma pista sobre as possíveis fontes e mecanismos relacionados à AME. Preliminarmente o mecanismo de poeira giratória é um forte candidato, mas ainda carece de investigação o que está impulsionando a poeira. Com uma grande coleta de dados relacionados a um maior número de detecções de AME e de suas diversas fontes, talvez seja possível desvendar esse mecanismo de impulso dos grãos de poeira.

Neste momento, diversos satélites e radiotelescópios baseados em terra continuam a coletar dados de fontes da Via Láctea com o objetivo de desvendar o desafio que representa a AME. Novos estudos devem explorar novos modelos teóricos e novas técnicas de mensuração, principalmente para o preenchimento das lacunas em diversas faixas de frequência de 1 a 100 GHz ainda não exploradas.

Os trabalhos aqui citados representam uma pequena parcela das centenas de estudos relacionados ao tema e não esgotam ou representam uma resposta definitiva sobre a origem da AME.

Por enquanto, o mistério da AME continua.

5. REFERÊNCIAS

Abdalla, E. et al. (2021). The BINGO Project I: Baryon Acoustic Oscillations from Integrated Neutral Gas Observations. Aceito para publicação, *Astronomy and Astrophysics*. arXiv:2107.01633.

Ali-Haïmoud, Y., Hirata, C. M., Dickinson, C. (2009), *A refined model for spinning dust radiation*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 395(2): 1055–1078

Ali-Haïmoud, Y. (2014), *Rotational spectroscopy of interstellar PAHs*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 437: 2728–2743.

Andrews H., et al. (2015), *PAH Emission at the Bright Locations of PDRs: the grandPAH Hypothesis*. *The Astrophysical Journal*, 807:9.

ASTROPARSEC: O porquê dos observatórios espaciais, 2021. Disponível em: < <https://astroparsec.com/2021/05/19/o-porque-dos-observatorios-espaciais> >. Acesso em: 12 de maio de 2022.

Bell, A. C. et al. (2019), Investigation of the Origin of the Anomalous Microwave Emission in Lambda Orionis, *Astronomical Society of Japan*.

Bennett, C.L. et al. (1992), *Preliminary separation of Galactic and cosmic microwave emission for the COBE differential microwave radiometer*. *The Astrophysical Journal Letters*. v. 396, n. 1, Part. 2, L7-L12.

Bennett, C.L. et al. (2003), *First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Foreground Emission*, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 148, 97.

Bremsstrahlung.svg, Wikimedia Commons, 2007. Disponível em: < <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Bremsstrahlung.svg> >. Acesso em: 12 de maio de 2022.

Comins, N. F.; Kaufmann, W. J., *Descobrendo o Universo*. 8ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2010.

de Oliveira-Costa, A. et al. (1997), *Galactic Microwave Emission at Degree Angular Scales*, The Astrophysical Journal, 482, L17.

Dickinson, C. et al. (2013), *Anomalous Microwave Emission: Theory, Modeling, and Observations*, Advances in Astronomy, Volume 2013, Article ID 134979.

Dickinson, C. (2018a). *Large-Scale Features of the Radio Sky and a Model for Loop I*, Galaxies 6, no. 2: 56.

Dickinson, C. et al. (2018b), *The State-of-Play of Anomalous Microwave Emission (AME) Research*, New Astronomy Reviews.

Draine, B. T.; Lazarian, A. (1998), *Electric Dipole Radiation from Spinning Dust Grains*, The Astrophysical Journal, 508, 157.

Draine, B. T.; Lazarian, A. (1999), *Magnetic Dipole Microwave Emission from Dust Grains*, The Astrophysical Journal, 512: 740-754

Durrer, R. (2015). *The cosmic microwave background: the history of its experimental investigation and its significance for cosmology*. Classical and Quantum Gravity, 32(12), 124007.

Erickson, W.C. (1957), *A Mechanism of Non-Thermal Radio-Noise Origin*. The Astrophysical Journal, 126:480.

Greaves, J. S. et al. (2018), *Anomalous Microwave emission from spinning nanodiamonds around stars*. Nature Astronomy 2, pp. 662-667.

Hensley, B. S.; Draine, B. T.; Meisner, A. M. (2016), *A Case Against Spinning PAHs as the Source of the Anomalous Microwave Emission*, The Astrophysical Journal, 827:45

Hueso, R., Guillot, T. (2003). *Evolution of the protosolar nebula and formation of the giant planets*. Space science reviews, 106(1), 105-120.

Jones, M. E. et al. (2018), *The C-Band All-Sky Survey (C-BASS): Design and capabilities*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, MNRAS 000, 1-21.

Karssemeijer, L. J.; Pedersen, A.; Jónsson, H.; Cuppen, H. M. (2012), *Long-timescale simulations of diffusion in molecular solids*, Physical Chemistry Chemical Physics Journal.

Kogut, A. et al. (1996), *High-latitude galactic emission in the COBE differential microwave radiometer 2 year sky maps*, The Astrophysical Journal, 460, 1.

Leitch, E.M.; Readhead, A.C.S.; Pearson T.J.; Myers, S.T. (1997), *An Anomalous Component of Galactic Emission*. The Astrophysical Journal, Volume 486, Issue 1, pp. L23-L26.

NASA/Goddard Space Flight Center: The Multiwavelength Milky Way, 2018. Disponível em: < https://asd.gsfc.nasa.gov/archive/mwmw/mmw_sci.html >. Acesso em: 12 de maio de 2022.

Planck Collaboration (2006). *The scientific programme of Planck*, Arxiv Astrophysics, arXiv:astro-ph/0604069v1.

Planck Collaboration (2011). *Planck early results. XX. New light on anomalous microwave emission from spinning dust grains*, *Astronomy & Astrophysics*, 536, A20.

Planck Collaboration (2014), *Planck intermediate results. XV. A study of anomalous microwave emission in Galactic clouds*, *Astronomy & Astrophysics*, 565, A103.

Radio Astronomy and Super-Synthesis: A Survey, 2010. Disponível em: < https://www.researchgate.net/figure/a-Force-on-a-moving-charge-in-a-magnetic-field-b-An-electron-at-relativistic-speed_fig4_228678515 >. Acesso em: 18 de maio de 2022.

Radio Astronomy and Super-Synthesis: A Survey, 2010. Disponível em: < https://www.researchgate.net/figure/Flux-density-measured-on-Earth-as-a-result-of-radio-emission-from-different-astronomical_fig2_228678515 >. Acesso em: 18 de maio de 2022.

Rennie, T. J. et al. (2022), *COMAP Early Science: VI. A First Look at the COMAP Galactic Plane Survey*, *Arxiv Astrophysics*, arXiv:2111.05932

Shannon, M. J.; Stock, D. J.; Peeters, E. (2015), *Probing the ionization states of polycyclic aromatic hydrocarbons via the 15–20 μm emission bands*, *The Astrophysical Journal*, Volume 811, Issue 2, pp. 153-169.

Tibbs, C. T. et al. (2011), *Spitzer characterization of dust in an anomalous emission region: the Perseus cloud*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 418:1889–1900.

Tielens, A. G. G. M. (2013), *The molecular Universe*. *Reviews of Modern Physics*, 85:1021–1081.

Types of Astronomical Spectra. Australia Telescope National Facility. Disponível em: https://www.atnf.csiro.au/outreach//education/senior/astrophysics/spectra_astro_types.html#spectypestar. Acesso em: 18 de maio de 2022.

Weaver, J. R. et al. (2022), *COSMOS2020: A Panchromatic View of the Universe to $z \sim 10$ from Two Complementary Catalogs*, The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 258, Issue 1, id 11.

Wuensche, C. A. et al. (2021), *The BINGO Project II: Instrument Description*, Aceito para publicação, *Astronomy and Astrophysics*. arXiv:2107.01634.

Ysard N., Verstraete L. (2010), *The long-wavelength emission of interstellar PAHs - characterizing the spinning dust contribution*, *Astronomy & Astrophysics*, 509, A12.