

Explorando a fronteira entre Inteligência Artificial e Astronomia na Educação

Exploring the border between Artificial Intelligence and Astronomy in Education

Thassiana Aparecida de Almeida¹, Ricardo Roberto Plaza Teixeira¹

¹Instituto Federal de São Paulo – Campus Caraguatatuba

thassiana.a@aluno.ifsp.edu.br, rteixeira@ifsp.edu.br

Resumo. *A crescente influência da Inteligência Artificial (IA) tem causado impactos profundos tanto na investigação astronômica, quanto na educação. Este artigo explora a evolução da IA na astronomia e na exploração espacial, destacando sua capacidade exponencial na resolução de complexidades computacionais para a análise de dados astronômicos, tendo em perspectiva a possibilidades de uso destes temas em atividades educacionais. Mais especificamente, são examinadas algumas inovações propiciadas pelo uso da IA no estudo de oito diferentes áreas temáticas: exoplanetas, estrelas, buracos negros, supernovas, galáxias, matéria escura, astrobiologia e astronáutica. A evolução da IA na astronomia se sobressaiu, em especial, na análise de dados coletados por telescópios modernos, utilizando algoritmos de aprendizado de máquina para lidar com o grande volume de informações. A constante evolução da IA em diferentes campos da astrofísica e da exploração espacial abre possibilidades propícias para o trabalho de conteúdos associados a este desenvolvimento no ensino de ciências.*

Palavras-chave: Ensino. Astrofísica. Astroinformática. Dados. Transdisciplinaridade.

Abstract. *The growing influence of Artificial Intelligence (AI) has had profound impacts on both astronomical research and education. This article explores the evolution of AI in astronomy and space exploration, highlighting its exponential capacity in resolving computational complexities for the analysis of astronomical data, taking into account the possibilities of using these themes in educational activities. More specifically, some innovations brought about by the use of AI in the study of eight different thematic areas are examined: exoplanets, stars, black holes, supernovae, galaxies, dark matter, astrobiology and astronautics. The evolution of AI in astronomy stands out, in particular, in the analysis of data collected by modern telescopes, using machine learning algorithms to deal with the large volume of information. The*

constant evolution of AI in different fields of astrophysics and space exploration opens up favorable possibilities for working on content associated with this development in science teaching.

Keywords: *Teaching. Astrophysics. Astroinformatics. Data. m Transdisciplinarity.*

1. Introdução

Este é um artigo exploratório com o objetivo de examinar as interseções entre o conceito de Inteligência Artificial (IA) e tópicos de astronomia, tendo em vista as possibilidades educacionais do trabalho com estes temas em sala de aula. Em particular, é estudado como as tecnologias de IA estão transformando a pesquisa em astronomia, com o intuito de apresentar inovações que possam ser discutidas e integradas de maneira eficaz no ensino. O estudo do papel da IA na análise de grandes conjuntos de dados astronômicos e na descoberta de padrões complexos oferece oportunidades significativas para trabalhar não somente com questões conceituais da astrofísica contemporânea, mas também com as formas como a ciência produz novos conhecimentos. Ao explorar, em sala de aula, casos de uso da IA em pesquisas em astrofísica, é possível refletir sobre os padrões que os astrônomos procuram nos seus trabalhos como cientistas.

A IA não é uma metodologia em si, mas sim um campo transdisciplinar de pesquisa que se dedica ao estudo e ao desenvolvimento de sistemas e algoritmos capazes de executar tarefas que normalmente requerem inteligência humana. Portanto, de modo geral, a investigação acerca das suas diferentes aplicações pode envolver uma variedade de metodologias, técnicas e abordagens, dependendo dos objetivos específicos de cada pesquisa. Métodos experimentais, por exemplo, podem ser empregados para testar o desempenho de algoritmos em diferentes cenários; isso pode incluir a coleta e análise de dados para avaliar a precisão, a eficácia e a eficiência de sistemas automatizados em tarefas específicas. Por outro lado, abordagens teóricas e analíticas podem ser necessárias para entender os princípios subjacentes aos algoritmos e seus impactos na astronomia, na educação e em uma grande gama de outras áreas do saber.

A utilização de exemplos de utilização da IA em áreas da astronomia apresenta aspectos promissores para a educação científica, pois propiciam abordagens inovadoras que contribuem para a melhoria do nível de compreensão de conceitos astronômicos e para o aumento do interesse dos alunos em aprender sobre o universo, bem como permitem criar aulas mais dinâmicas e interativas para o processo de aprendizagem (Khorolskyi, 2023).

A convergência sem precedentes entre o aumento substancial do poder computacional, a explosão de dados e o refinamento dos algoritmos de aprendizado de máquina vem resultando em avanços notáveis nas tecnologias de IA, em especial com o desenvolvimento de sistemas computacionais e máquinas que sejam capazes de desenvolver sistemas que demonstrem comportamento inteligente e executem tarefas

com um nível de competência no mínimo similar ao de um ser humano (Oliveira *et al.*, 2023), podendo emular habilidades de aprendizado, raciocínio, adaptação e autocorreção. Como consequência tem sido cada vez mais imperativo integrar a IA nos currículos e, em particular, na educação científica (Jia, Sun & Looi, 2024).

É importante, entretanto, lembrar que a introdução de tecnologias emergentes na prática educacional enfrenta desafios intrínsecos devido à sua rápida evolução, o que torna a atualização e a formação contínua de professores uma necessidade constante (Piccione *et al.*, 2024).

A IA está transformando os métodos de ensino, ao oferecer uma gama de ferramentas e recursos inovadores para educadores e alunos. Uma possibilidade concreta é a adaptação de conteúdos educacionais às necessidades individuais de cada aluno. A automação de tarefas administrativas libera tempo para os educadores se concentrarem mais no ensino criativo e na interação humana, enriquecendo assim a experiência educacional (Azambuja & Silva, 2024). Além disso, os sistemas de IA podem analisar grandes volumes de dados para identificar padrões de desempenho dos alunos, ajudando os professores no processo de ensino. Esta mesma característica associada à capacidade de análise de grandes dados pode ser usada para a investigação em diversas áreas da astrofísica contemporânea, como os exemplos trabalhados neste artigo mostram.

A sinergia entre educação e IA possibilita promover uma abordagem mais interativa e eficiente para o aprendizado, pois permite que os educadores ofereçam intervenções direcionadas, a partir de simulações realistas e assistentes virtuais que pode ajudar a preparar os alunos para um futuro cada vez mais digital e dinâmico.

O crescente impacto da IA na sociedade tem redefinido de maneira significativa os paradigmas científicos e tecnológicos, deixando uma marca notável em diversos aspectos da vida cotidiana e, em particular, nos avanços da investigação astronômica. A aplicação da IA no campo da astronomia e nos estudos espaciais revela um potencial exponencial para resolver complexidades computacionais e realizar análises de dados que transcendem as capacidades humanas.

A crescente integração entre IA e astronomia – por exemplo, na análise de grandes conjuntos de dados astronômicos, obtidos por telescópios espaciais e observatórios terrestres, para identificar padrões, classificar objetos celestes e até mesmo descobrir novos fenômenos cósmicos – permite usar, no âmbito educacional, uma variedade de ferramentas e recursos para ajudar os alunos a aprenderem acerca de conceitos científicos complexos sobre o universo. A simulação de eventos astronômicos, como eclipses solares e lunares, e a visualização, por meio de modelos tridimensionais interativos, de sistemas estelares e de galáxias distantes, proporcionam aos alunos uma experiência imersiva, podendo esclarecer dúvidas, aprimorar a compreensão conceitual e facilitar a exploração autônoma do espaço.

Levando em consideração as possibilidades educacionais existentes para o trabalho com tais temas em sala de aula, este artigo investiga a evolução e a crescente utilização da IA para abordar desafios substanciais na astronomia e astrofísica, focando especialmente na compreensão e pesquisa em algumas áreas – mais especificamente, no estudo de exoplanetas, estrelas, buracos negros, supernovas, galáxias, matéria escura,

astrobiologia e astronáutica – que exigem cálculos extremamente complexos, precisos e em grandes quantidades. A IA, nestes e em outros casos, por meio de algoritmos e sistemas avançados, demonstra uma capacidade de processamento e aprendizado que supera as limitações humanas, permitindo uma análise mais rápida e eficaz de equações astronômicas envolvidas.

Especificamente, a astroinformática é uma disciplina crucial e em ascensão na era atual da astronomia, pois é movida pela quantidade muito grande de dados, a partir da combinação, de modo interdisciplinar, do estudo da astronomia, da ciência de dados e da informática. Diante do crescimento exponencial nos volumes de dados provenientes de diversos levantamentos do céu, a astroinformática é uma resposta necessária para gerenciar, organizar e extrair significado de vastas coleções de informações astronômicas. Essa disciplina abrange uma gama de especialidades interrelacionadas, desde a organização eficiente de dados até a criação de catálogos astronômicos, mineração de dados, aprendizado de máquina, IA e estatísticas específicas usadas em astronomia.

2. Inteligência Artificial na astronomia

Desde o início do século XXI, os campos da astronomia e astrofísica têm experimentado um crescimento significativo nos níveis observacional e computacional, resultando na aquisição de volumes cada vez maiores de dados. Para processar essa vasta quantidade de informações, técnicas de IA estão sendo combinadas com mineração de dados para detectar padrões com o objetivo de modelar, classificar ou prever o comportamento de certos fenômenos ou objetos astronômicos (Rodríguez, Rodríguez-Rodríguez & Woo, 2022).

O rápido crescimento do uso da IA nesta área tem sido crucial para a obtenção de uma compreensão científica mais ampla do universo, a partir da análise dos dados obtidos por telescópios e observatórios modernos, com destaque para a aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina para enfrentar os desafios existentes. Por exemplo, a IA revela-se fundamental na busca por exoplanetas habitáveis, na classificação de galáxias e supernovas e no estudo da matéria escura (Chen, Kong & Kong, 2020).

A aprendizagem de máquina (processos automatizados que aprendem, por exemplo, para classificar, prever, descobrir ou gerar novos dados) e a IA (métodos pelos quais um computador toma decisões ou faz descobertas que normalmente exigiriam inteligência humana) estão cada vez mais integradas na astronomia, com novas aplicações sendo regularmente adicionadas em atividades de classificação, regressão, agrupamento, previsão, geração, descoberta e desenvolvimento de novos *insights* científicos (Fluke & Jacobs, 2020).

Uma parte da pesquisa em astronomia envolve a busca de padrões em extensos conjuntos de dados, o que, frequentemente resulta em descobertas não planejadas e cria novas relações entre teoria e observação. No contexto astronômico contemporâneo, os astrônomos têm trabalhado com computadores para que eles aprendam sobre as possíveis relações presentes em conjuntos de dados de treino, de modo a aplicarem esse

conhecimento a conjuntos de dados reais. As imagens astronômicas brutas que frequentemente são caracterizadas por imprecisões, planos de fundo desordenados, poluentes, artefatos desconhecidos e ruído, representam um desafio significativo para a investigação científica. A necessidade de processamento extensivo e de limpeza de imagens é imperativa para torná-las não apenas compreensíveis, mas também úteis para a pesquisa astronômica. Essa é uma tarefa que demanda um considerável esforço e envolve processos automatizados e intervenção manual para alcançar resultados satisfatórios (Djorgovski *et al.*, 2022).

Ao lidar com enormes volumes de dados gerados por telescópios espaciais e terrestres, a IA é capaz de identificar padrões, classificar objetos celestes e até mesmo fazer descobertas astronômicas significativas e de modo relativamente rápido, algo que demandaria uma quantidade imensa de tempo de trabalho humano. Por exemplo, algoritmos podem ser treinados para reconhecer características específicas em imagens astronômicas, como galáxias, estrelas ou planetas, permitindo uma análise muito mais precisa dos dados. Além disso, o uso de simulações astronômicas permite modelar eventos complexos como a formação de galáxias, a criação de estrelas, a colisão de corpos celestes (como buracos negros, por exemplo) e a evolução do próprio cosmos (Alves-Brito & Cortesi, 2021). Essas simulações tanto podem ajudar os astrônomos a compreenderem melhor os processos que ocorrem no universo, quanto podem, também, servir como ferramentas educacionais poderosas, permitindo que os alunos explorem e visualizem fenômenos astronômicos de maneira interativa.

3. Possibilidades educacionais das aplicações da Inteligência Artificial na astronomia

O ensino de astronomia estabelece uma conexão entre o aluno e o cosmos que nos cerca, transcendendo sua realidade imediata. Embora esta ciência possua uma beleza cativante e esteja bastante relacionada à vida cotidiana, é uma disciplina que demanda algum grau de abstração: para que a observação dos astros seja significativa, é essencial que ela seja complementada por estudos teóricos, já que os fenômenos astronômicos não são de tão fácil compreensão (Leite & Hosoume, 2007).

O estudo da astronomia oferece uma oportunidade para os alunos explorarem a interdisciplinaridade entre as ciências naturais. Ao examinar aspectos científicos por trás dos fenômenos astronômicos, os estudantes são incentivados a integrar conhecimentos de disciplinas como física, matemática, química, biologia e história para entender plenamente os processos que governam os planetas, as estrelas, as galáxias e o universo. Essa abordagem interdisciplinar não apenas fortalece a compreensão dos alunos sobre os princípios físicos envolvidos, mas também promove uma apreciação mais profunda da complexidade do cosmos, estimulando uma abordagem integrada do estudo das diversas áreas das ciências (Dias & Santa Rita, 2008).

A astronomia mantém uma presença constante em diversos meios de divulgação, como sites, revistas, programas televisivos, museus de ciências, além de instituições como planetários e observatórios, sem mencionar o importante papel desempenhado por astrônomos amadores na comunidade. Isso reflete a forte motivação e popularidade da

astronomia junto ao público leigo, em geral, até porque seu laboratório natural é o céu que está acessível a todos, algo que pode ajudar a contribuir para a promoção da cultura científica (Langhi & Nardi, 2009).

Frequentemente, muitos alunos desenvolvem concepções equivocadas ou distorcidas sobre temas de astronomia, influenciados por fontes de informação não confiáveis; nesse contexto, cabe ao professor abordar didaticamente os conceitos científicos consolidados e as evidências experimentais mais robustas existentes a respeito. Para superar este problema, é fundamental adotar práticas que facilitem a compreensão dos tópicos estudados, como a integração entre teoria e prática e o engajamento dos alunos com os tópicos abordados (Lattari & Trevisan, 1999).

A incorporação de temas de astronomia no ensino de ciências, desempenha um papel importante para a compreensão de conceitos científicos mais importantes envolvidos. A astronomia fornece um cenário para a aplicação de teorias científicas, permitindo que os alunos explorem fenômenos como a gravidade, as órbitas planetárias e a propagação da luz. Esses tópicos fornecem exemplos concretos para ilustrar e contextualizar princípios científicos mais abstratos, tornando o aprendizado mais tangível para os estudantes. Em particular, há no ensino da astronomia e da física muitos conceitos em comum (devido à estreita relação entre essas disciplinas) que podem ser trabalhados conjuntamente, inclusive por uma abordagem histórica que pode enriquecer o processo de aprendizagem (Marrone Júnior & Trevisan, 2009).

É fundamental considerar cuidadosamente a seleção dos temas de astronomia a serem abordados em diferentes níveis de ensino, levando em conta não apenas seu aspecto científico, mas também sua capacidade de desencadear discussões sobre as características fundamentais das ciências naturais (Gama & Henrique, 2010). Escolher esses temas de forma estratégica permite trabalhar não apenas com conceitos astronômicos, mas também sobre os contextos culturais, históricos e filosóficos que moldaram nossa compreensão do universo ao longo do tempo, capacitando os alunos a refletirem sobre o papel da ciência na sociedade.

Tendo em vista o potencial educacional envolvido, a seguir, serão analisados alguns temas associados à astronomia que vem apresentando, no seu desenvolvimento mais recente, uma crescente interface com aplicações na área da IA: exoplanetas, estrelas, buracos negros, supernovas, galáxias, matéria escura, astrobiologia e astronáutica.

3.1. Exoplanetas

Um exoplaneta é um planeta que orbita uma estrela fora do nosso sistema solar. Em outras palavras, são planetas que não estão localizados no entorno direto do Sol, mas sim ao redor de outras estrelas em nossa galáxia, a Via Láctea, ou fora dela. A descoberta e caracterização de exoplanetas têm se tornado uma área significativa de pesquisa na astronomia moderna. Esses planetas podem variar em tamanho, composição e órbita, e sua detecção geralmente envolve observações precisas de variações na luz da estrela hospedeira ou técnicas diretas de imagem, entre outros métodos. A identificação e o estudo de exoplanetas são fundamentais para expandir nosso entendimento sobre a

diversidade planetária e as condições necessárias para a existência de vida em outros sistemas estelares (Seager, 2011).

No caso da área de estudo de exoplanetas, mais de 30% dos que são conhecidos até o momento foram descobertos por meio da “validação”, em que é calculada a probabilidade estatística de um trânsito ser resultado de um falso positivo, ou seja, de uma situação não relacionada à existência de planetas. Como é altamente desejável que o catálogo de planetas conhecidos não dependa apenas de um único método, por meio de algoritmos de aprendizado de máquina, é possível realizar a validação probabilística de planetas, considerando probabilidades prévias para possíveis cenários de falsos positivos (Armstrong, Gamper & Damoulas, 2021)

Essas ideias permitiram a descoberta em 2020 de cinquenta exoplanetas por pesquisadores da Universidade de Warwick, situada no Reino Unido, o que ocorreu por meio da implementação de IA. O algoritmo utilizado recebeu e processou dados provenientes de telescópios da NASA, como o observatório Kepler e o *Transiting Exoplanet Survey Satellite* (TESS), que culminaram na identificação desses novos corpos celestes.

3.2. Estrelas

O estudo da formação de estrelas, na astrofísica, procura desvendar os processos que levam à criação e à evolução estelar. Em particular, são investigadas as regiões interestelares nas quais as densidades elevadas de gás e poeira proporcionam um ambiente propício para o nascimento de uma nova estrela. Por meio de observações em diferentes faixas espectrais é possível discernir os estágios evolutivos iniciais deste processo nas nuvens, em que o fenômeno de contração gravitacional resulta na formação de protoestrelas (estrelas jovens em processo de formação). A compreensão dos mecanismos que regem esse processo, incluindo a interação complexa entre campos magnéticos, a turbulência do material envolvido e as interações químicas existentes, é essencial para desvendar a forma como as estrelas surgem no universo (Oliveira Filho, 2014).

Um sistema de IA dedicado à análise de dados provenientes do telescópio espacial Gaia identificou, em 2020, mais de 2.000 protoestrelas, revelando pistas cruciais sobre a origem das estrelas na Via Láctea; anteriormente, apenas cerca de 100 dessas estrelas haviam sido catalogadas, sendo que tais estudos são fundamentais para compreender a formação estelar. A pesquisa utilizou técnicas de aprendizado de máquina para examinar dados do telescópio Gaia, resultando em descobertas significativas que podem transformar a compreensão científica sobre a formação de estrelas massivas, proporcionando uma abordagem inovadora no estudo galáctico. O estudo enfocou estrelas que têm massa pelo menos duas vezes maior que a do Sol, aproveitando a imensa quantidade de dados coletados pelo Gaia desde 2013 (Vioque *et al.*, 2020).

Este tipo de abordagem está abrindo um novo capítulo na astronomia e é um excelente exemplo de como a análise de grandes dados (“*Big Data*”) coletados por instrumentos científicos modernos moldará o futuro da astrofísica. Neste e em outros

casos, os sistemas de IA são capazes de identificar padrões em grandes quantidades de dados que poderão levar a novas descobertas científicas.

3.3. Buracos negros

Um buraco negro é uma região do espaço-tempo cuja gravidade é tão intensa que nada, nem mesmo a luz, consegue escapar de sua atração: em termos físicos, esta característica significa que a velocidade de escape na superfície de um buraco negro é maior que a velocidade da luz. Isso resulta em uma região com um campo gravitacional extremamente forte, a ponto de curvar o espaço-tempo de maneira significativa. A formação de um buraco negro ocorre quando uma estrela massiva esgota seu combustível nuclear e entra em colapso sob sua própria gravidade, comprimindo-se em um volume extremamente pequeno. As propriedades características de um buraco negro incluem um horizonte de eventos, uma fronteira além da qual nada pode retornar, e uma singularidade, um ponto de densidade infinita no centro. Buracos negros podem variar em tamanho, desde aqueles formados pela morte de estrelas até os supermassivos encontrados no centro de galáxias (Meier, 2012).

Em 2019, a primeira imagem de um buraco negro revelou um objeto difuso em forma de rosquinha, semelhante a uma massa incandescente, proporcionando uma visão do imenso buraco negro no centro da galáxia M87, situada a cerca de 53 milhões de anos-luz da Terra. Essa imagem foi produzida pelo trabalho computacional com uma quantidade muito grande de dados coletados por uma rede de radiotelescópios ao redor do mundo (Neves, 2020).

Técnicas de IA, quatro anos depois, foram usadas para aprimorar essa imagem cósmica, em uma pesquisa que contou com a participação de uma cientista brasileira, a astrofísica Lia Medeiros. A imagem obtida, manteve a forma original, mas com um anel mais estreito e uma resolução mais nítida. Especificamente, a determinação da largura da imagem fornece um limite superior natural para a incerteza na inferência da massa do buraco negro (Medeiros *et al.*, 2023). Uma imagem mais nítida permite informações mais detalhadas sobre as propriedades do buraco negro e a gravidade no seu entorno, o que contribui para estudos futuros sobre as propriedades de buracos negros.

A união entre astrofísica e ciência da computação permite também simular o funcionamento de um buraco negro por meio de *Deep Learning*, de modo a compreender mais sobre esses objetos celestes, a partir das leis de conservação envolvidas. A resolução das equações diferenciais em foco envolve cálculos numéricos muito complexos e demorados que são abreviados com o uso de IA, o que permite aprender a física daquilo que está ocorrendo e é útil para reconhecer e entender os padrões existentes (Duarte, Nemmen & Navarro, 2022).

3.4. Supernovas

Supernovas são eventos cataclísmicos no ciclo de vida estelar, caracterizados pelo explosivo colapso de uma estrela muito massiva em suas fases finais. Essas poderosas explosões liberam uma quantidade extraordinária de energia, muitas vezes

superando a luz emitida por bilhões de estrelas em uma galáxia. Existem diferentes tipos de supernovas, cada uma associada a mecanismos específicos. Além de iluminar o cosmos com sua luminosidade transitória, as supernovas desempenham um papel vital na síntese de elementos pesados, enriquecendo o meio interestelar e contribuindo para a formação de novas estrelas e sistemas planetários. O estudo desses eventos cósmicos ajuda na compreensão tanto da física estelar extrema, quanto da evolução do universo em larga escala (Arnett, 1996).

Um novo sistema totalmente automatizado, liderado pela Northwestern University em colaboração internacional, em 2023, usando uma ferramenta de IA, conseguiu a primeira detecção, identificação e classificação automática de uma supernova no mundo (Rehemtulla *et al.*, 2023). O sistema, após um treinamento com mais de 1 milhão de imagens históricas, eliminou a necessidade de intervenção humana no processo de busca por supernovas, acelerando significativamente a análise e classificação desses eventos cósmicos (Morris, 2023).

Assim, o tempo humano dedicado à inspeção visual e classificação de candidatas a supernovas, pode ser realocado, pelos cientistas, para outras tarefas, impulsionando a eficiência das descobertas astronômicas. A automação proporcionada pela IA representa um avanço significativo, permitindo uma análise mais rápida e a capacidade de desenvolver novos modelos para entender a origem das explosões estelares.

3.5. Galáxias

Uma galáxia é um vasto sistema gravitacionalmente ligado, composto por estrelas, planetas, gás interestelar, poeira cósmica, matéria escura e outros componentes astronômicos, que estão agrupados em uma estrutura relativamente coesa. As galáxias são os blocos fundamentais da estrutura do universo, variando em tamanho, desde pequenos agrupamentos até grandes sistemas contendo bilhões ou mesmo trilhões de estrelas. Existem diversos tipos de galáxias, incluindo espirais (que são as mais típicas), elípticas e irregulares. A estrutura e o comportamento das galáxias são governados pelas interações gravitacionais entre seus componentes, sendo que muitas galáxias também abrigam buracos negros supermassivos em seus centros. A Via Láctea, que inclui o nosso sistema solar, é a galáxia espiral na qual vivemos. O estudo das galáxias desempenha um papel crucial na cosmologia, contribuindo para a compreensão da evolução e estrutura do universo em larga escala (Bertin, 2014). Uma boa fonte de informações científicas e bem fundamentadas sobre galáxias – e de acesso aberto na internet – é o livro didático online “*Dynamics and Astrophysics of Galaxies*” de Jo Bovy (2023) que, após apresentar inicialmente os fundamentos da dinâmica gravitacional na escala das galáxias, explora os processos dinâmicos e astrofísicos que moldam a formação e evolução das galáxias no universo e apresenta as principais ferramentas teóricas e observacionais utilizadas para o seu estudo.

A classificação de galáxias é um exemplo adicional do uso de algoritmos alimentados com imagens de galáxias e com as regras de classificação das galáxias conhecidas até o momento. As classificações preexistentes foram elaboradas mediante processos manuais, seja pelos próprios pesquisadores ou por meio de iniciativas de ciência cidadã voluntária. Utilizando a IA é possível realizar automaticamente a

identificação de galáxias em conjuntos de dados reais, apresentando uma eficiência notadamente superior e uma menor suscetibilidade a erros quando comparada ao processo de classificação manual.

Tomando como exemplo, um grupo de pesquisadores em astronomia, predominantemente vinculados ao Observatório Astronômico Nacional do Japão, empregando IA em imagens de amplo campo de visão do universo capturadas pelo Telescópio Subaru, obteve uma alta taxa de precisão na identificação e classificação de galáxias espirais nessas imagens. Essa abordagem foi complementada pela ciência cidadã (*citizen science*), uma abordagem colaborativa na qual membros do público em geral, muitas vezes não especialistas em ciência, participam ativamente em projetos de pesquisa científica que envolvem a coleta, análise e interpretação de dados, sob a orientação de cientistas profissionais (Costa, 2020). Ao despertar o interesse da sociedade pela ciência e levar as pessoas a se envolverem com investigações científicas, a ciência cidadã colabora para a ampliação da construção do conhecimento e com a aprendizagem (Martons & Cabral, 2021).

A combinação das duas metodologias (IA e ciência cidadã) pode ser propulsora de descobertas futuras. Os pesquisadores em questão aplicaram uma técnica de *Deep Learning* para classificar galáxias em um extenso conjunto de dados de imagens obtidas por meio do Telescópio Subaru. Devido à sua extrema sensibilidade, o telescópio detectou cerca de meio milhão de galáxias nas imagens. Este trabalho assumiu relevância significativa, uma vez que a tarefa de identificar tantas galáxias por meio da observação humana para classificação morfológica seria praticamente impossível. Graças à IA, a equipe conseguiu processar as informações sem a necessidade de intervenção humana (National Institutes of Natural Sciences, 2020).

Estas técnicas se intensificaram a partir de 2012, com o rápido desenvolvimento de técnicas automatizadas de processamento para extração e avaliação de características por meio de algoritmos de *Deep Learning* e que apresentam maior precisão do que a capacidade humana. Mediante o uso de dados de treinamentos elaborados por humanos, a IA foi capaz de classificar com sucesso as morfologias das galáxias no banco de dados com uma taxa de precisão de 97,5%, identificando padrões espirais em aproximadamente 80.000 galáxias (Tadaki *et al.*, 2020).

A compreensão da formação e evolução galáctica é um dos desafios significativos na astronomia moderna. A IA permite investigar a evolução geral das galáxias, colabora para a interpretação da emissão de radiação galáctica e contribui para enfrentar o problema clássico de classificação de objetos astronômicos, diferenciando entre estrelas, galáxias, quasares e supernovas (Cunha & Humphrey, 2023).

3.6. Matéria escura

A matéria escura é um componente do universo que não emite, absorve ou reflete luz, sendo, portanto, invisível e indetectável por meios convencionais. A sua presença é inferida pelos efeitos gravitacionais observados nas galáxias e no cosmos em grande escala, superando em quantidade a matéria visível em cerca de cinco vezes. Apesar de constituir aproximadamente 27% da composição total do universo, a natureza

precisa da matéria escura permanece desconhecida. Ela não interage eletromagneticamente, o que a diferencia da matéria comum, e as tentativas de sua detecção direta têm sido desafiadoras. A existência da matéria escura é fundamental para explicar a estrutura e a evolução do universo, influenciando a formação de galáxias e a distribuição em larga escala da matéria. O seu estudo é uma das áreas de fronteira da ciência na astrofísica contemporânea (Seigar, 2015).

Os conhecimentos existentes acerca da matéria escura têm avançado com o uso de IA, pela fusão entre tecnologia e astrofísica de modo a modelar e analisar fenômenos complexos, como, por exemplo, as lentes gravitacionais. O uso de redes neurais no estudo das lentes gravitacionais é um testemunho do poder da IA na simulação de fenômenos astronômicos intrincados. Essas redes conseguem analisar grandes volumes de dados, realizando análises complicadas de maneira rápida e totalmente automatizada. A arquitetura das redes neurais permite que elas aprendam autonomamente quais características procurar, o que é semelhante à forma como as crianças aprendem a reconhecer objetos. A capacidade de autoaprendizado – ou seja, de aprender autonomamente quais características procurar – permite identificar e classificar objetos celestes com uma velocidade e precisão sem precedentes, bem como possibilita que os cientistas dediquem o seu tempo para outras atividades de pesquisa. Deste modo, pela triagem de dados, a IA auxilia na identificação de aglomerados de galáxias, no cálculo de suas massas e na distribuição de matéria escura (Wang *et al.*, 2023).

No estudo da matéria escura, metodologias que usam IA e redes neurais conseguem fornecer valores 30% mais precisos do que os obtidos por métodos tradicionais baseados em análises estatísticas feitas manualmente (Furi *et al.*, 2019).

3.7. Astrobiologia

A astrobiologia é uma área científica interdisciplinar que busca compreender a origem, a evolução e a distribuição da vida no universo. Unindo princípios da astronomia, biologia, química e geologia, a astrobiologia (ou exobiologia) explora as condições e os processos que podem sustentar a vida, tanto na Terra quanto em outros corpos celestes. Ela investiga ambientes extremos em nosso próprio planeta, ou seja, ecossistemas extremófilos, como regiões subterrâneas profundas, para extrapolar esses conhecimentos para a busca por vida além da Terra. Além disso, a astrobiologia engloba a procura por exoplanetas com condições de habitabilidade e a busca por sinais de vida extraterrestre, ou seja, por bioassinaturas (Galante *et al.*, 2016).

A IA pode ser treinada – a partir de células vivas, fósseis, meteoritos e produtos químicos produzidos em laboratório – para detectar vida alienígena em amostras físicas. Uma pesquisa publicada em 2023 tratou de um algoritmo de aprendizagem automática que consegue distinguir, com sucesso, 90% das vezes, entre amostras de origem biológica e não biológica. Ele poderá ser usado para procurar por vida em Marte, a partir de rochas marcianas coletadas pelo *rover Curiosity*. Este método não depende de identificação precisa de compostos e permite, inclusive, que possamos ser capazes de encontrar formas de vida em um outro planeta, mesmo que seja muito diferente da vida que conhecemos na Terra (Cleaves II *et al.*, 2023).

Por outro lado, mais especificamente, a “Busca por Inteligência Extraterrestre” – associada, em inglês, à área de pesquisa cuja sigla é SETI: *Search for Extraterrestrial Intelligence* – é um campo de fronteira da ciência que se insere na interseção da astronomia, astrobiologia e comunicação interestelar, envolvendo o uso de radiotelescópios e outros instrumentos para detectar sinais de rádio ou outras formas de comunicação emitidos por hipotéticas civilizações alienígenas em diferentes partes do universo. Essa empreitada científica baseia-se na premissa de que, se existirem outras formas de vida inteligente no cosmos, elas eventualmente desenvolverão a capacidade de se comunicar de maneiras semelhantes às tecnologias terrestres. Os cientistas do SETI buscam padrões ou sinais distintos que possam indicar a presença de uma inteligência organizada em meio ao ruído cósmico (Sagan & Drake, 1997). Embora nenhum sinal inequívoco tenha sido detectado até o momento, o SETI continua a desempenhar um papel relevante na exploração científica.

O objetivo da “Busca por Inteligência Extraterrestre” (SETI) é identificar a existência de vida tecnológica além da Terra por meio de “tecnoassinaturas”, que são equivalentes às bioassinaturas usadas para identificar sinais de vida. O principal desafio ao conduzir o SETI no domínio da faixa de sinais de rádio é desenvolver uma técnica generalizada para rejeitar interferências humanas de radiofrequência de modo a manter a taxa de falsos positivos o mais baixa possível. Os cientistas que buscam por evidências de vida inteligente fora da Terra, estão usando sistemas que superam os algoritmos clássicos nas tarefas de detecção, a partir do treinamento de IA para analisar dados provenientes de radiotelescópios em busca de sinais que não poderiam ser atribuídos a processos astrofísicos naturais. Este pode ser um campo promissor de uso de técnicas de IA aplicada à astronomia orientada por dados (Ma *et al.*, 2023).

3.8. Astronáutica

A astronáutica é um campo que se dedica ao estudo e à exploração do espaço exterior e combina elementos de física, engenharia aeroespacial e ciência da computação, de modo a compreender os complexos desafios associados à viagem espacial e à exploração de corpos celestes. Desde o lançamento do primeiro satélite artificial, o Sputnik 1, em 1957, a astronáutica tem desempenhado um papel fundamental na expansão do conhecimento humano sobre o universo. O desenvolvimento de tecnologias como foguetes, sondas espaciais e estações espaciais evidencia a busca por avanços que possibilitem a exploração de planetas distantes, a compreensão de fenômenos cósmicos e, no limite, a colonização interplanetária no futuro (Spitzmiller, 2007).

A ascensão da IA tem marcado uma revolução crescente também na astronáutica, pelo potencial de substituir competências humanas em áreas de risco ou inacessíveis, incluindo tarefas como raciocínio, tomada de decisões, comunicação, análise de dados, percepção e ação. No caso da exploração espacial, a IA pode proporcionar ferramentas sofisticadas para os humanos que habitam o espaço e possibilidades de explorar regiões onde nós ainda não conseguimos ir (Kumar & Tomar, 2018).

Seja no suporte a astronautas na Estação Espacial Internacional, no planejamento de missões espaciais, no *design* de satélites ou na gestão de detritos espaciais para evitar colisões, a IA desempenha um papel multifacetado. Além disso, sua contribuição se estende à autonomia concedida às sondas espaciais, à manutenção de satélites em órbita e à independência dos movimentos de *rovers* em planetas como Marte. Ao mapear com precisão corpos celestes, como a Lua, a IA tem se destacado, crescentemente, como uma ferramenta vital na expansão do conhecimento sobre o cosmos e na capacidade humana de explorar e compreender o universo.

Em 2022, a ESA (*The European Space Agency*) financiou 12 projetos que exploraram a aplicação dos últimos desenvolvimentos em IA e paradigmas avançados de computação para tornar os satélites mais reativos, ágeis e autônomos e gerar novas aplicações práticas que apoiassem a exploração de outros planetas. Alguns dos projetos pesquisaram como satélites equipados com IA poderiam melhorar diretamente nossas vidas na Terra, por exemplo, detectando vazamentos de metano de forma mais eficaz e gerenciando desastres do espaço. Outros analisaram como esses satélites mais inteligentes poderiam apoiar uma exploração lunar mais sustentável e tornar os *rovers* lunares mais independentes (ESA, 2023).

4. Considerações finais

A inserção da IA na astronomia representa um avanço significativo, agilizando e facilitando as análises realizadas pelos astrônomos. Ao ser aplicada no estudo de corpos celestes, a IA acelera os processos e desempenha um papel essencial nesse campo científico. Além de otimizar a análise de dados astronômicos que são criados em cada vez maiores quantidades, a IA contribui para a simulação e modelagem do universo, elevando a precisão das observações astronômicas. É crucial destacar que a IA não substitui, mas complementa os astrônomos em suas pesquisas, estabelecendo uma sinergia entre o conhecimento humano e as capacidades de processamento da IA. Essa colaboração potencializa a astronomia, proporcionando a descoberta de novos *insights* sobre o cosmos.

Por exemplo, o uso de simulações e animações no ensino de astronomia oferece aos alunos a oportunidade de explorar fenômenos complexos do universo de maneira interativa. Por meio de simulações computacionais, os alunos podem visualizar e manipular modelos tridimensionais de sistemas estelares, galáxias, planetas e outros corpos celestes, permitindo uma compreensão mais profunda dos conceitos astronômicos e indo além do que é apresentado em imagens bidimensionais. Além disso, as simulações podem ser usadas para recriar eventos astronômicos específicos, como eclipses solares, movimentos planetários e colisões de asteroides, estimulando a curiosidade e proporcionando aos alunos a oportunidade de observar esses fenômenos e as suas consequências, de maneira segura e controlada.

O estudo das aplicações da IA na astronomia pode colaborar significativamente com a educação científica de diversas maneiras. Primeiramente, ao integrar a IA no campo da astronomia, os educadores têm a oportunidade de proporcionar aos estudantes uma compreensão prática de como as tecnologias emergentes são aplicadas para resolver problemas complexos na pesquisa espacial.

Além disso, ao incorporar exemplos específicos de como a IA é utilizada na análise de dados astronômicos, simulações e modelagem do universo, os alunos podem visualizar como a tecnologia está transformando a forma como os astrônomos coletam, processam e interpretam informações cósmicas. Essa abordagem prática pode tornar os conceitos científicos mais tangíveis e envolventes para os estudantes, estimulando o interesse e a participação ativa nas disciplinas relacionadas à astronomia e à ciência da computação.

Adicionalmente, o estudo das aplicações da IA na astronomia permite que os educadores destaquem o papel fundamental da interdisciplinaridade, mostrando como a colaboração entre a astronomia e a ciência da computação leva a novas descobertas. Isso promove uma compreensão mais integral da ciência e pode estimular estudantes talentosos para futuras carreiras em áreas científicas. Em resumo, ao explorar as aplicações práticas da IA na astronomia, os alunos se beneficiam pela visão aplicada desses campos interconectados e pela compreensão de como o conhecimento científico é produzido. A apresentação do uso de ferramentas de IA na astronomia e na astronáutica estimula o desenvolvimento de habilidades críticas e promove um maior interesse pela exploração do universo.

Um possível desdobramento futuro desta pesquisa é a elaboração de materiais didáticos acerca de alguns dos objetos de estudo deste artigo para a área de ensino de astronomia e ciências em geral.

Ao contemplar a interseção entre IA, astronomia e ensino, é evidente que as sinergias entre essas disciplinas têm o potencial de modificar as visões existentes acerca do cosmos. A disseminação do conhecimento astronômico, impulsionada pela IA, cria uma ponte entre a complexidade do universo e o avanço tecnológico, tornando os conceitos de astrofísica mais acessíveis.

Agradecimentos

Agradecemos à CAPES pelo fomento concedido para esta pesquisa.

Referências

- Alves-brito, Alan & Cortesi, A. (2021). Complexidade em Astronomia e Astrofísica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 43, e20200418. <https://www.scielo.br/j/rbef/a/v56DKDxvnLr3wGDYDKWWCJh/?lang=pt#>
- Armstrong, David J., Gamper, Jevgenij & Damoulas, Theodoros (2021). Exoplanet validation with machine learning: 50 new validated Kepler planets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 504(4). <https://academic.oup.com/mnras/article/504/4/5327/5894933?login=false>
- Arnett, David (1996). *Supernovae and Nucleosynthesis*. Princeton, U.S.A.: Princeton University Press.

- Azambuja, Celso Candido de & Silva, Gabriel Ferreira da (2024). Novos desafios para a educação na Era da Inteligência Artificial. *Unisinos Journal of Philosophy*, 25(1), e25107, 1-12. <https://revistas.unisinos.br/index.php/filosofia/article/view/27063>
- Bertin, Giuseppe (2014). *Dynamics of Galaxies*. New York, U. S. A.: Cambridge University Press.
- Bovy, Jo (2023). *Dynamics and Astrophysics of Galaxies*. <https://galaxiesbook.org/>
- Chen, Yatong, Kong, Rui & Kong, Linghe (2020). 14 - Applications of artificial intelligence in astronomical big data. *Science Direct, Big Data in Astronomy, Scientific Data Processing for Advanced Radio Telescopes*, ELSEVIER, 347-375. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128190845000067>
- Cleaves II, H. James *et al.* (2023). A robust, agnostic molecular biosignature based on machine learning. *PNAS*, 120(41), e2307149120. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2307149120>
- Costa, Ilídio André Pinto Monteiro (2020). *Ciência Cidadã: envolvimento do público na investigação e divulgação em astronomia*. Tese de Doutoramento em Ensino e Divulgação das Ciências, Universidade do Porto, Portugal. <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/127896/2/409652.pdf>
- Cunha, Pedro & Humphrey, Andrew (2022). Artificial Intelligence helps in the identification of astronomical objects. *Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço*. https://divulgacao.iastro.pt/en/2022/05/26/sheep_eng/
- Dias, Cláudio André C. M. & Santa Rita, Josué R (2008). Inserção da astronomia como disciplina curricular do ensino médio. *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia (RELEA)*, 6, 55–65. DOI: 10.37156/RELEA/2008.06.055. <https://www.relea.ufscar.br/index.php/relea/article/view/121>
- Djorgovski, S. George *et al.* (2022). Applications of AI in Astronomy. ArXiv. <https://arxiv.org/abs/2212.01493>
- Duarte, Roberta, Nemmen, Rodrigo & Navarro, João Paulo (2022). Black Hole Weather Forecasting with Deep Learning: a Pilot Study. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 512(4), 5848–5861. https://www.iag.usp.br/sites/default/files/2023-05/arxiv_RN003_2102.06242.pdf
- ESA (2023). *Artificial Intelligence in space*. https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/Artificial_intelligence_in_space
- Fluke, Christopher J. & Jacobs, Colin (2020). Surveying the reach and maturity of machine learning and artificial intelligence in astronomy. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, 10(2), e1349. <https://arxiv.org/pdf/1912.02934.pdf>
- Furi, Janis *et al.* (2019). Cosmological constraints with deep learning from KiDS-450 weak lensing maps. *Physical Review D*, 100, 06351. <https://arxiv.org/pdf/1906.03156.pdf>

- Galante, Douglas *et al.* (2016). *Astrobiologia: uma ciência emergente*. São Paulo: IAG/USP. https://www.iag.usp.br/sites/default/files/2023-01/2016_galante_horvath_astrobiologia.pdf
- Gama, Leandro Daros & Henrique, Alexandre Bagdonas (2010). Astronomia na sala de aula: por quê? *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia (RELEA)*, 9, 7–15. <https://doi.org/10.37156/RELEA/2010.09.007>
- Jia, Fenglin, Sun, Daner & Looi, Chee-kit (2024). Artificial Intelligence in Science Education (2013–2023): Research Trends in Ten Years. *Journal of Science Education and Technology*, 33, 94–117. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10956-023-10077-6>
- Khorolskyi, Oleksii (2023). The Role of Virtual Platforms in Modern Astronomy Education: Analysis of Innovative Approaches. *Futurity Education*, 3(3), 249–265. <https://futurity-education.com/index.php/fed/article/view/216>
- Kumar, Shiwanshu & Tomar, Ravi Tomar (2018). The Role of Artificial Intelligence in Space Exploration. *IEEE, International Conference on Communication, Computing and Internet of Things, IC3IoT*. <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/8663973/proceeding>
- Langhi, Rodolfo & Nardi, Roberto (2009). Ensino da astronomia no Brasil: educação formal, informal, não formal e divulgação científica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 31(4), 4402. <https://www.scielo.br/j/rbef/a/jPYT5PRkLsY5TJQfM8pDWKB/abstract/?lang=pt>
- Lattari, Cleiton Joni Benetti & Trevisan, Rute Helena (1999). Metodologia para o ensino de Astronomia: Uma abordagem Construtivista. *Atas do II Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciência (ENPEC)*, Valinhos (SP). <https://fep.if.usp.br/~profis%20arquivo/encontros/enpec/iienpec/Dados/trabalhos/G13.pdf>
- Leite, Cristina & Hosoume, Yassuko (2007). Os professores de ciências e suas formas de pensar a astronomia. *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia (RELEA)*, 4, 47–68. DOI: 10.37156/RELEA/2007.04.047. <https://www.relea.ufscar.br/index.php/relea/article/view/99>
- Ma, Peter Xiangyuan *et al.* (2023). A deep-learning search for technosignatures from 820 nearby stars. *Nature Astronomy*, 7, 492–502. <https://www.nature.com/articles/s41550-022-01872-z>
- Marrone Júnior, Jayme & Trevisan, Rute Helena (2009). Um perfil da pesquisa em ensino de astronomia no Brasil a partir da análise de periódicos de ensino de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 26(3), 547–574. <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewFile/11885/14082>
- Martins, Diny Gabrielly de Miranda & Cabral, Eloisa Helena de Souza (2021). Panorama dos principais estudos sobre ciência cidadã. *ForScience*, 9(2), e01030. <https://forscience.ifmg.edu.br/index.php/forscience/article/view/1030>

- Medeiros, Lia *et al.* (2023). The Image of the M87 Black Hole Reconstructed with PRIMO. *The Astrophysical Journal Letters*, 947(1). <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/acc32d>
- Meier, David L. (2012). **Black Hole Astrophysics: The Engine Paradigm**. New York, U.S.A.: Springer.
- Morris, Amanda (2023). *First supernova detected, confirmed, classified and shared by AI*. Northwestern University. <https://news.northwestern.edu/stories/2023/10/first-supernova-detected-confirmed-classified-and-shared-by-ai/>
- National Institutes of Natural Sciences (2020). Classifying galaxies with artificial intelligence. *ScienceDaily*. www.sciencedaily.com/releases/2020/08/200811120120.htm
- Neves, Juliano C. S. (2020). O buraco negro e sua sombra. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 42, e20200216. <https://www.scielo.br/j/rbef/a/MNc6M6njv79NbCcbLjBW9HB/?lang=pt&format=html#>
- Oliveira, Arthur Marques de *et al.* (2023). www.Educação e Inteligência Artificial.com: um estudo sobre a aplicação de IA em perspectiva docente. *Informática na Educação: Teoria & Prática*, 26(2), 11-27. <https://seer.ufrgs.br/index.php/InfEducTeoriaPratica/article/view/136448>
- Oliveira Filho, Kepler de Souza (2014). *Evolução e Interiores Estelares*. UFRGS. <http://astro.if.ufrgs.br/evol/node1.htm>
- Piccione, A. *et al.* (2024). Training teachers on new topics and new tools in Physics education. *Journal of Physics: Conference Series*, 2693, 012010. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2693/1/012010/meta>
- Rehemtulla, Nabeel *et al.* (2023). SN 2023tyk: discovery to spectroscopic classification performed fully automatically. *AstroNote*, 2023-265. <https://www.wis-tns.org/astronotes/astronote/2023-265>
- Rodríguez, José-Víctor, Rodríguez-Rodríguez, Ignacio & Woo, Wai Lok (2022). On the application of machine learning in astronomy and astrophysics: A text-mining-based scientometric analysis. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, 12(5). <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/widm.1476>
- Sagan, Carl & Drake, Francis (1997). The search for extraterrestrial intelligence. *Scientific American*. <https://www.scientificamerican.com/article/the-search-for-extraterre/>
- Seager, Sara (2011). *Exoplanets*. Tucson, U.S.A.: University of Arizona Press.
- Seigar, Marc S. (2015). *Dark Matter in the Universe: IOP Concise Physics (Hardback)*. Kentfield, U.S.A.: Morgan & Claypool.
- Spitzmiller, Ted (2007). *Astronautics: Book 1 – Dawn of the Space Age*. Burlington, Canada: Collector's Guide Publishing.
- Tadaki, Ken-ichi *et al.* (2020). Spin parity of spiral galaxies II: a catalogue of 80 k spiral galaxies using big data from the Subaru Hyper Suprime-Cam survey and deep

- learning. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 496(4), 4276-4286. <https://academic.oup.com/mnras/article/496/4/4276/5866497?login=false>
- Vioque, M. *et al.* (2020). Catalogue of new Herbig Ae/Be and classical Be stars. *Astronomy & Astrophysics*, 638, A21. https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2020/06/aa37731-20/aa37731-20.html
- Wang, Zitong *et al.* (2023). Mapping the large-scale density field of dark matter using artificial intelligence. *Science China - Physics, Mechanics & Astronomy*, 67(1), 219513. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11433-023-2192-9>