

# Em busca dos primeiros buracos negros supermassivos do Universo

José Afonso<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço e Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

jafonso@iaastro.pt

## Resumo

A existência de galáxias no primeiro milhar de milhões de anos do Universo, na chamada Época de Reionização, encontra-se hoje estabelecida. Se uma parte destes sistemas aparenta brilhar devido a radiação produzida por estrelas, alguns, de propriedades extremas, quasares, brilham devido à queda violenta de matéria para um buraco negro supermassivo. Atingindo massas de  $10^9$  massas solares ( $M_{\odot}$ ), a formação de tais objetos em apenas algumas centenas de milhões de anos, é de difícil compreensão, mesmo com os modelos teóricos mais avançados. Nos últimos anos, tornou-se premente a identificação e caracterização destes quasares na Época de Reionização do Universo, algo que parece essencial para compreender a formação de galáxias e de estruturas, a reionização do hidrogénio neutro durante os primeiros 800 milhões de anos, e a formação dos primeiros buracos negros no Universo. Neste artigo, discutirei o desafio da procura destes primeiros buracos negros supermassivos do Universo, as estratégias que nos estão a revelar, lenta mas inevitavelmente, os quasares mais distantes, e como procuramos hoje planificar a exploração do primeiro milhar de milhões de anos do Universo com a próxima geração de telescópios.

## Introdução

Pensamos que, após o Big Bang e a nucleossíntese primordial que teve lugar nos primeiros 20 minutos, o Universo era constituído por prótons e neutrões, isolados ou ligados em núcleos de hidrogénio e hélio (e algum lítio), eletrões e radiação. Durante os primeiros milhares de anos, a temperatura era demasiado elevada para permitir a ligação dos eletrões aos núcleos, não sendo possível a propagação da radiação – permanentemente absorvida e reemitida pelos eletrões livres. Apenas após 380 000 anos o Universo terá expandido e arrefecido o suficiente para a formação dos primeiros átomos, permitindo finalmente a propagação da luz. Esta luz é detetada ainda hoje – a chamada radiação cósmica de fundo em micro-ondas – e o seu estudo ajuda a compreender as propriedades físicas do Universo 380 000 anos após o Big Bang.

É, contudo, preciso esperar 300 ou 400 milhões de anos para assistirmos à primeira grande produção de radiação no Universo. É no final desta longa “Idade das Trevas” primordial que apa-

recem as primeiras galáxias e estrelas que, de formas ainda não totalmente compreendidas, originam radiação suficientemente energética para reionizar os átomos formados anteriormente. Dá-se aí início à Época de Reionização, uma das mais emocionantes fronteiras do conhecimento astrofísico atual.

A primeira geração de estrelas é, naturalmente, o principal suspeito para esta nova transição de fase do Universo. Surpreendentemente, um outro suspeito existe, um suspeito que é, em muitos sentidos, a “antítese” das estrelas – buracos negros supermassivos. Tendo de alguma forma crescido espetacularmente ao longo das primeiras centenas de milhões de anos do Universo, sabemos hoje que a radiação produzida pela queda violenta de gás para estes “monstros” contribui não só para a Época de Reionização, mas pode ser a chave para a compreensão da formação das galáxias e estruturas no Universo.

Quando, e como, se deu a formação das primeiras galáxias? Quando, e como, se formaram as primeiras estrelas e buracos negros supermassivos, e de que forma a radiação que eles originaram conseguiu reionizar rapidamente todo o Universo? Como se deu a evolução do gás neutro ao longo dessas breves centenas de milhões de anos iniciais? Estamos hoje muito próximos de conseguir, pela primeira vez, responder a estas perguntas: não só temos ao nosso alcance telescópios e instrumentos cada vez mais sensíveis, que começam a descortinar a Época de Reionização, como possuímos modelos teóricos cada vez mais precisos e robustos que nos ajudam a desenvolver estratégias eficientes para o estudo do Universo primitivo.

## O fim da Idade das Trevas do Universo

Ao longo dos últimos anos, temos assistido a um sucesso crescente na deteção de galáxias a distâncias cada vez maiores (e, portanto, galáxias num Universo cada vez mais jovem). Tais observações permitiram identificar os dois processos fundamentais para a formação e evolução primordial das primeiras galáxias e, supõe-se, para a reionização do Universo: a formação

de estrelas e a queda da matéria para um buraco negro supermassivo no centro de uma galáxia - um núcleo galáctico ativo (AGN).

Antes de nos focarmos no segundo processo, de particular interesse para esta publicação, refira-se que a formação de estrelas em galáxias muito jovens tem sido o alvo preferencial de várias equipas de investigadores, que recorrem às observações mais profundas hoje existentes no óptico e no infravermelho próximo (por exemplo, Finkelstein et al. 2015, Bowens et al. 2016). As técnicas observacionais usadas baseiam-se na emissão de radiação ultravioleta por parte de estrelas muito jovens, massivas e quentes, e na sua interação com o gás da galáxia - uma sonda ideal para a procura de populações estelares jovens. Embora seja hoje frequente a deteção de formação de estrelas em galáxias nos primeiros 700 milhões de anos (chegando as observações já aos primeiros 500 milhões de anos, Oesch et al. 2016), o seu estudo mostra que não estamos ainda perante a primeira geração de estrelas do Universo, as chamadas estrelas de População III. De facto, as observações mais sensíveis destas galáxias distantes revelam radiação produzida por elementos como o carbono e o oxigénio, necessariamente produzidos no interior de estrelas anteriores (Figura 1). Surpreendentemente, apesar desta formação estelar aparentemente abundante no primeiro milhar de milhões de anos, não é ainda possível afirmar que a reionização do Universo é provocada (unicamente) por estrelas, pois a radiação (estelar) sugerida pelas observações não parece ser ainda suficiente.

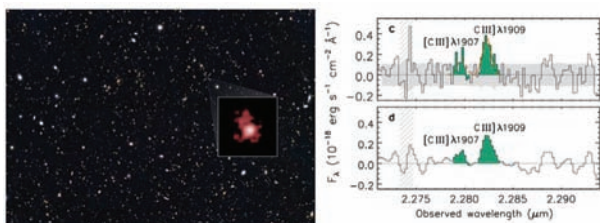


Fig. 1 - Esquerda: A galáxia GN-z11 (figura inserida) terá existido quando o Universo tinha apenas 400 milhões de anos, sendo detetada com um redshift  $z \sim 11$ . Esta é a galáxia mais distante hoje conhecida, descoberta nas observações do Telescópio Espacial Hubble do levantamento *Great Observatories Origins Deep Survey North* (em fundo). Crédito: NASA, ESA e P. Oesch (Oesch et al., 2016). Direita: A deteção, num espectro em infravermelho próximo, de emissão de carbono na galáxia GN-z11, revelando um enriquecimento químico sugestivo da existência de gerações anteriores de estrelas (Jiang et al., 2021).

É, pois, com renovado interesse que tem aumentado o estudo do segundo fenómeno que sabemos ser importante para a Época de Reionização - a emissão de radiação por parte de material em queda para um buraco negro supermassivo, um AGN ou um quasar, no caso de uma luminosidade extrema<sup>1</sup>. Este é um processo que parece acompanhar, e talvez mesmo justificar, a

formação e crescimento das primeiras galáxias. Para a deteção de AGN distantes são frequentemente usados diagnósticos observacionais no óptico e infravermelho próximo (por exemplo, Bañados et al. 2016) ou radiofrequências (por exemplo, Miley & De Breuck, 2008). No primeiro caso, a seleção com base em cores (óptico-óptico ou óptico-infravermelho) tem sido continuamente melhorada para ser sensível à radiação gerada no ambiente energético do AGN, em particular no caso dos mais luminosos, os quasares. Em radiofrequências, que revelam a radiação de sincrotrão produzida pela aceleração de eletrões relativísticos no campo magnético intenso do AGN, a luminosidade pode atingir níveis de tal forma elevados que a deteção é possível, com os telescópios atuais, em qualquer lugar do Universo (por exemplo, Afonso et al. 2015, Bañados et al. 2018, 2021)! É possível mesmo que já tenhamos detectado um dos primeiros quasares do Universo, mas que não o tenhamos reconhecido como tal, já que a caracterização da sua distância é uma das medições mais difíceis, eventualmente mesmo impossível, de efetuar atualmente.

Note-se que já nesta década, o Square Kilometer Array (SKA), um rádiotelescópio muito mais poderoso do que os atualmente em funcionamento, será capaz de estudar diretamente a evolução do hidrogénio neutro na Época da Reionização, à medida que aumenta a sua ionização pelas primeiras fontes de luz. Tal estudo será possível detectando a absorção que o hidrogénio provoca na luz de um AGN brilhante ainda mais distante, dentro da Época de Reionização, efetuando uma observação em “contra-luz” (Carilli et al. 2004). Este objetivo futuro é um ponto de particular interesse para a seleção de AGN distantes brilhantes em radiofrequências. Métodos eficientes para alcançar as distâncias mais elevadas têm vindo a ser de-

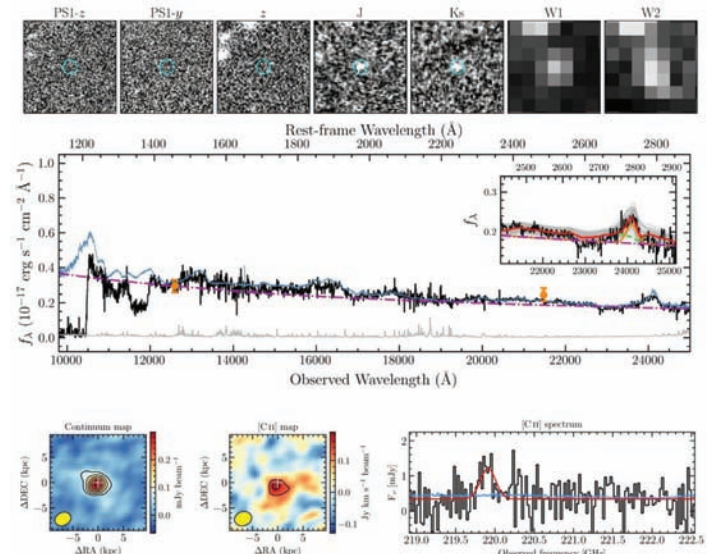


Fig. 2 - O quasar J0313-1806, o quasar mais distante até hoje detetado. Com um *redshift* de  $z=7,64$ , este AGN encontra-se num Universo com pouco mais de 600 milhões de anos. Apesar da juventude, alberga já um buraco negro supermassivo com cerca de 1,6 mil milhões de vezes a massa do Sol. No painel superior, a imagem da localização deste quasar em várias bandas ópticas e de infravermelho - o quasar apenas é detetado a partir da banda de infravermelho J. No painel central, o espectro óptico-infravermelho do J0313 (traço negro) é comparado com o espectro médio de quasares bastante mais próximos (traço azul), revelando uma semelhança impressionante para comprimentos de onda (observados) acima de 1,2 micrometros. A risca de emissão no painel inserido é a risca de magnésio (MgII), a partir da qual é possível a estimativa da massa do buraco negro central. No painel inferior, a deteção de carbono (risca [CII]) no milímetro, é reveladora de um ambiente já bastante rico em elementos complexos neste quasar, situado dentro da época de reionização (Wang et al. 2021).

<sup>1</sup> Em rigor, existem vários tipos de AGN, classificados consoante a radiação em que são detetados e estudados, luminosidade, variabilidade, entre outras características, tendo todos eles na origem da sua atividade a queda de matéria para um buraco negro supermassivo. Os quasares são habitualmente revelados no óptico e infravermelho, e possuem luminosidades extremas. Por simplificação, usamos neste artigo o termo quasar como sinónimo de AGN muito luminoso.

envolvidos: critérios que utilizam a comparação entre a emissão em rádio e o infravermelho (Norris et al. 2006, Jarvis et al. 2009, Huynh et al. 2010) serão, provavelmente, extremamente eficazes para atingir os maiores redshifts (Ker et al. 2012).

### A origem de buracos negros supermassivos na Época de Reionização

Ao longo dos últimos anos, a descoberta de buracos negros com massas gigantescas ( $10^8$ - $10^9$ )  $M_{\odot}$  na Época de Reionização, nos primeiros 800 milhões de anos do Universo (Mortlock et al. 2011, De Rosa et al. 2014, Wang et al. 2021; ver Figura 2), levanta problemas sérios para qualquer teoria de formação de galáxias e estrutura no Universo: como se consegue criar e fazer crescer um objeto tão massivo em apenas algumas centenas de milhões de anos? Se esses AGN poderosos já são detetados 600-800 milhões de anos após o Big Bang, então deverão existir a distâncias ainda maiores, em épocas ainda mais remotas, mesmo se com luminosidades ou massas ligeiramente menos extremas. Na Figura 3, pode-se apreciar o crescimento particularmente rápido que a descoberta de tais quasares impõe: a redshifts de 30, apenas 100 milhões de anos após o Big Bang, é necessário que o Universo possua já buracos negros com massas de  $\sim(10^3$ - $10^4)M_{\odot}$ .

As possibilidades para tais sementes, surpreendentemente, existem. Poderiam ser os remanescentes das primeiras estrelas do Universo (Pop III), se possuírem massas suficientemente elevadas. Estas estrelas, formadas entre 50 e 200 milhões de anos após o Big Bang (redshifts  $z \sim 20$ -50) e com massas acima de  $\sim 300 M_{\odot}$  (Abel et al. 2000, Bromm et al. 2002), entrariam em colapso apenas alguns milhões de anos após a sua formação, criando um buraco negro massivo (com mais de  $150 M_{\odot}$ ; Fryer et al. 2001). No entanto, modelos mais recentes indicam que tais massas estelares primordiais podem ser mais raras do que se pensava anteriormente (por exemplo, Turk et al. 2009, Stacy et al. 2012), o que tornaria mais difícil que remanescentes de estrelas de primeira geração fossem as sementes que se tornariam buracos negros supermassivos no final da Época da Reionização. Uma outra possibilidade seria o colapso direto do gás de baixo momento angular (ver por exemplo, Bromm & Loeb 2003, Mayer et al. 2010), o colapso simultâneo de um aglomerado de estrelas (Devecchi et al. 2010, 2012) ou mesmo buracos negros primordiais (Carr 2003).

Qualquer que seja a origem dos primeiros buracos negros no Universo, e o processo que levou ao seu crescimento extraordinariamente rápido ao longo de apenas algumas centenas de milhões de anos, o resultado final - a existência de buracos negros supermassivos no primeiro milhar de milhão de anos do Universo - parece ser possível do ponto de vista teórico (embora ainda não totalmente compreendido). Mais observações são agora essenciais para esclarecer sobre as reais origens destes objetos extremos.

### Em busca dos primeiros Quasares do Universo

A existência de quasares, alimentados por buracos negros supermassivos, na época de reionização do Universo, coloca questões empolgantes sobre as primeiras centenas de milhões de anos do Universo, questões para as quais procuramos hoje a resposta:

- Quando é que nasceram os primeiros buracos negros supermassivos, e quais serão os mecanismos possíveis para o seu crescimento rápido em apenas algumas centenas de milhões de anos?
- Qual é o papel dos buracos negros primordiais como sementes da formação de galáxias e sua evolução inicial?
- Qual a contribuição da radiação emitida por Quasares para a reionização do Universo?

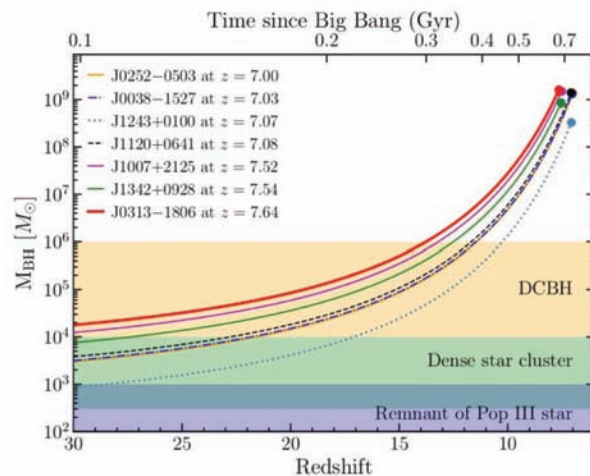


Fig. 3 - O crescimento dos buracos negros detectados no centro de quasares na Época de Reionização ( $z \sim 7$ -8), assumindo uma queda abundante de material (no chamado limite de Eddington). As diferentes possibilidades para a origem das sementes de tais buracos negros supermassivos são indicadas pelas regiões coloridas: colapso direto do gás de baixo momento angular (DCBH, região a amarelo), colapso simultâneo de um aglomerado de estrelas (região a verde) e os remanescentes das primeiras estrelas do Universo (a violeta). Figura de Wang et al., 2021.

Os levantamentos astronômicos já planejados para o futuro próximo deverão conseguir responder a algumas destas perguntas. Contudo, o seu sucesso está dependente de conseguir antever o que poderá ser revelado, e otimizar as futuras observações para a identificação eficiente dos primeiros quasares do Universo. E, por sua vez, esta planificação depende de possuir modelos robustos para as primeiras centenas de milhões de anos do Universo.

Atualmente, os modelos de formação e evolução de galáxias mais avançados possuem um sucesso muito grande na simulação das épocas mais recentes do Universo (por exemplo, Vogelsberger et al. 2020). É ao longo dos últimos 10-12 mil milhões de anos que se consegue testar e validar estes modelos, recorrendo às observações detalhadas que hoje possuímos. Estes modelos incorporam a queda de material para um buraco negro central, pois este parece ser um processo essencial para a compreensão da evolução de galáxias. O sucesso destes modelos, ainda que para épocas do Universo relativamente "recentes", permite confirmar a qualidade da descrição dos processos que estão na base da existência de quasares. Deverá, pois, ser possível, olhando para as fases iniciais destes Universos simulados, começar a compreender quais as características dos quasares na Época de Reioni-

zação, nas primeiras centenas de milhões de anos do Universo – e como poderemos otimizar os nossos telescópios, atuais e futuros, para a sua detecção.

Utilizando esta motivação, temos vindo a explorar alguns dos modelos mais avançados de evolução de galáxias para a detecção dos primeiros quasares do Universo, em particular considerando duas regiões do espectro electromagnético fortemente associadas com o processo de queda de material para um buraco negro supermassivo: os raios X, e as rádio-frequências<sup>2</sup>. O processo implica utilizar os parâmetros físicos de cada galáxia em cada modelo (em particular, massa e rotação do buraco negro central da galáxia e a respectiva taxa de acreção de matéria), considerar a libertação de energia na queda de matéria para o buraco negro, e estimar as quantidades que podem ser observadas – neste caso, luminosidade em raios-X e em rádiofrequências.

A exploração de 8 dos modelos mais recentes (Amarantidis et al., 2019) sugere que a detecção de quasares na Época da Reionização quer em raios-X quer em rádio-frequências, está ao alcance dos levantamentos que serão possíveis durante os próximos anos. Quer o futuro telescópio de raios-X Athena, em desenvolvimento pela Agência Espacial Europeia para um lançamento no início da próxima década, quer o Square Kilometre Array (SKA), um rádio-telescópio revolucionário que deverá iniciar observações no final desta década, na África do Sul e na Austrália, deverão conseguir detectar e estudar vários milhares de quasares na Época de Reionização do Universo.

Apesar das incertezas existentes, esta exploração dos modelos (Amarantidis et al., 2019) confirmou ainda que a detecção de quasares na Época da Reionização está ao alcance das observações atuais, embora com dificuldades – algo que está de acordo com os estudos referidos acima (por exemplo, Wang et al. 2021). Esta expectativa fica ainda mais fortalecida quando verificamos que os modelos atuais não conseguem ainda reproduzir os quasares mais poderosos que já hoje conhecemos, como se mostra na Figura 4. A subestimativa aparente de massas e luminosidades dos quasares mais poderosos nestes modelos do Universo, quando comparados com as observações, sugere que o Universo poderá conter uma população de quasares na Época da Reionização ainda mais abundante do que os modelos sugerem (ou pelo menos mais extrema, o que facilitará a observação). A melhoria destes modelos para o primeiro milhar de milhões de anos do Universo, incorporando a informação mais recente sobre os quasares extremos já observados, resultará em previsões ainda mais precisas para os telescópios em funcionamento no futuro próximo.

### Para além da detecção – a confirmação

Ainda que a detecção de quasares distantes seja possível, de acordo com estas simulações, falta ainda o difícil passo de identificar tais objetos. O levanta-

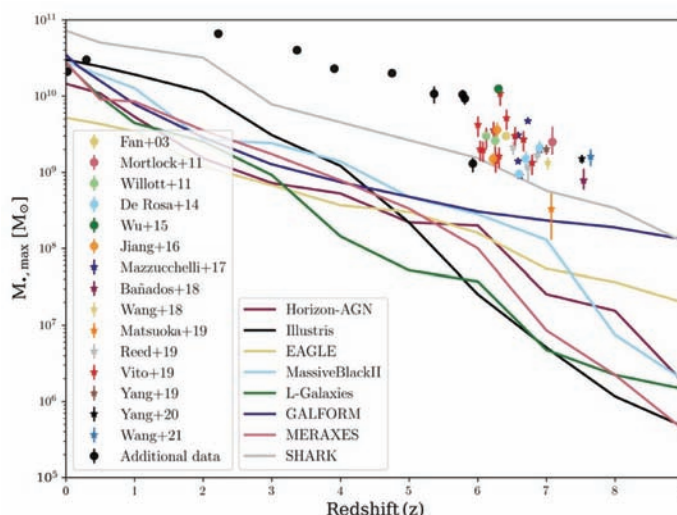


Fig. 4 – A massa dos buracos negros mais massivos no centro de galáxias tal como previsto por 8 modelos de formação e evolução de galáxias (linhas coloridas), comparada com alguns dos buracos negros supermassivos mais extremos já detectados. É patente que os modelos ainda não são capazes de simular os quasares mais extremos já hoje conhecidos. Figura adaptada de Amarantidis et al., (2019).

mento Evolutionary Map of the Universe (EMU, Norris et al. 2011), a ser atualmente iniciado com o Australia SKA Pathfinder (ASKAP), um dos precursores do rádio-telescópio SKA, deverá revelar mais de 70 milhões de fontes (na maior parte galáxias), espalhadas por todo o céu observável pelo ASKAP. Destas, apenas uma ínfima fração deverá corresponder a quasares na Época da Reionização. Para além da detecção, a identificação de tais “monstros” de entre milhões e milhões de outras detecções, representa um desafio gigantesco, não possível com observações astronómicas em apenas uma região restrita do espectro eletromagnético.

Assim, baseados nas simulações, iniciámos também recentemente o desenvolvimento de novas estratégias para a detecção mais eficiente de quasares na Época de Reionização, recorrendo a múltiplos comprimentos de onda – em particular, explorando técnicas de seleção que consideram, simultaneamente, as indicações de rádio e de infravermelho longínquo. O estudo de um dos vários candidatos encontrados é ilustrativo das dificuldades deste tipo de investigação, onde a confirmação é ainda mais importante do que a eventual detecção.

A fonte CVLA100 foi inicialmente identificada como de potencial interesse nas observações em rádio-frequências no campo COSMOS, uma região no céu que tem sido observada de forma exaustiva para o estudo da evolução de galáxias. Foi detetada em infravermelho longínquo com o observatório espacial Herschel, que esteve em funcionamento entre 2009 e 2013, e o estudo subsequente mostrou que deveremos estar perante uma galáxia com um AGN a distâncias elevadas (redshift maior que 3 e talvez mesmo maior que 6 – uma idade do Universo menor que 2 mil milhões de anos, e talvez mes-

<sup>2</sup> Este interesse é não só justificado pela enorme luminosidade que os quasares podem atingir em raios-X e no rádio, facilitando a sua detecção e estudo, como também pela participação nacional em futuros telescópios revolucionários nestes comprimentos de onda: o telescópio de raios-X Athena (Nandra et al., 2013), em desenvolvimento pela Agência Espacial Europeia (ESA) e com um enfoque muito grande no Universo primordial (Aird et al., 2013); e o futuro rádio-telescópio SKA e os seus precursores, em particular o Australia SKA Pathfinder e o MeerKAT, na África do Sul.

mo menor que mil milhões de anos), algo compatível com a sua não deteção em comprimentos de onda ópticos (Figura 5).

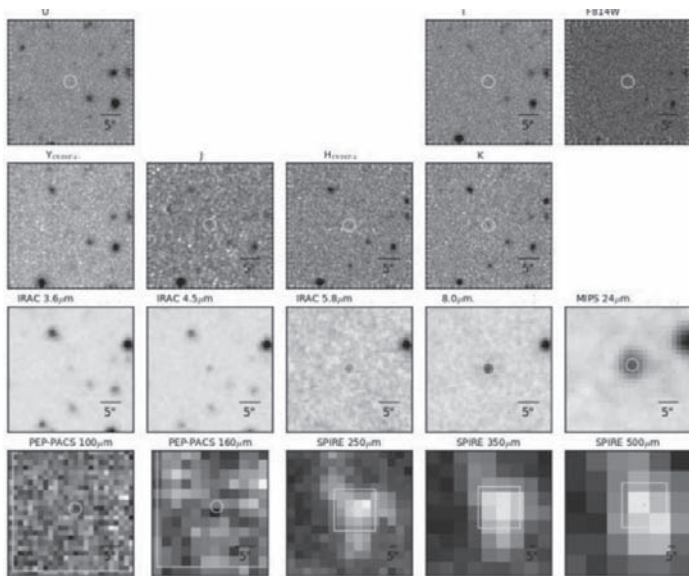


Fig. 5 - A rádio galáxia CVLA100, uma candidata a quasar a distâncias elevadas, não é detectada em algumas das imagens astronómicas mais sensíveis no óptico (fila superior), mas começa a ser perceptível no infravermelho próximo e médio (segunda e terceira filas) e é claramente detectada no infravermelho longínquo (fila inferior). Tal comportamento é característico de galáxias a distâncias muito elevadas, e sinalizou esta galáxia como de interesse para estudos mais detalhados (imagem por I. Matute, IA/FCUL).

O interesse nesta fonte levou a observações detalhadas com aquele que é um dos telescópios mais poderosos da atualidade, o Atacama Large Millimetre Array (ALMA), possivelmente o único que pode confirmar a sua distância. As observações tiveram, contudo, um sucesso limitado, já que o espectro da galáxia, nos comprimentos de onda (milímetro) onde o ALMA opera, revelou apenas uma risca de emissão – insuficiente para a medição da sua distância (Figura 6). Observações posteriores não conseguiram revelar, até agora, uma muito ansiada segunda risca de emissão, com a consequente determinação da sua distância. A galáxia CVLA100 permanece pois, por agora, como uma fonte de interesse – um candidato a quasar na Época da Reionização, para o qual continuamos a procurar uma confirmação.

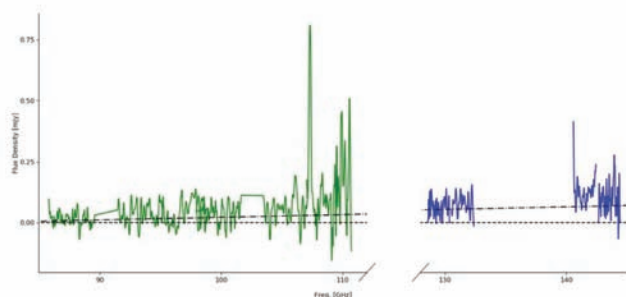


Fig. 6 - O espectro da rádio galáxia CVLA100 obtido com o ALMA, um dos telescópios mais poderosos da atualidade. Apesar da deteção segura de uma risca de emissão a aproximadamente 107 GHz, a não deteção de uma segunda risca de emissão impede, até agora, a determinação da sua distância (imagem por I. Matute e S. Amaratidis, IA/FCUL).

## Uma nova abordagem – Big Data

O exemplo anterior revela as tremendas dificuldades que o estudo do Universo primitivo enfrenta, com os telescópios atuais conseguindo revelar algo, mas muitas vezes não o suficiente, da Época de Reionização. A situação será certamente diferente no futuro, mas o avanço do conhecimento não pode esperar por novas e melhores capacidades – há, pois, necessidade de explorar outras abordagens.

Uma das mais promissoras, perseguida também pelo nosso grupo, consiste em olhar para a época imediatamente após da Época de Reionização, a distâncias um pouco menores. Nesta fase da evolução do Universo, entre mil e dois mil milhões de anos após o Big Bang, conhecemos milhares de quasares (Figura 7), e o seu estudo, acumulado ao longo de vários anos, resulta num conhecimento relativamente detalhado das suas características: nomeadamente brilhos aparentes e luminosidades a vários comprimentos de onda, massas do buraco negro central, distâncias e taxa de formação estelar. É assim possível imaginar que, através da aplicação de técnicas de Inteligência Artificial neste enorme conjunto de dados, consigamos desenvolver algoritmos que auxiliem a identificação eficiente de potenciais quasares a distâncias muito mais elevadas, na Época da Reionização.

Apesar de estarmos apenas nos primeiros passos, os resultados iniciais sugerem que podemos almejar desenvolver um algoritmo que, se aplicado às observações do EMU, em rádio e em outros comprimentos de onda, permitirá identificar de forma robusta quasares distantes. Mais ainda: as distâncias estimadas por uma versão inicial de um tal algoritmo revelam uma elevada precisão, suficiente para alterar por completo as estratégias de procura destes habitantes da Época de Reionização – e, consequentemente, revolucionar o conhecimento desta época primordial das estrelas, galáxias e o Universo.

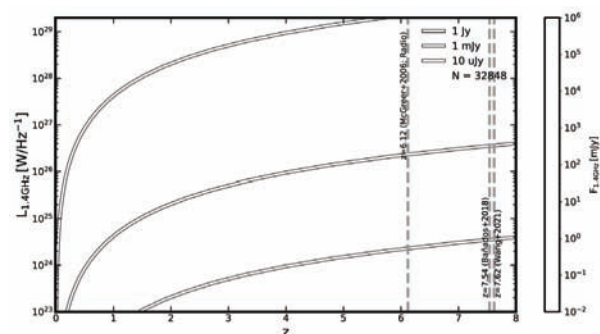


Fig. 7 - Compilação de luminosidades em rádio (1,4 GHz) de AGN até distâncias elevadas (a Época de Reionização corresponde ao lado direito neste gráfico, para redshifts superiores a aproximadamente 6). As curvas representam vários níveis de sensibilidade de levantamentos astronómicos em rádio frequências: o levantamento EMU, que começou a ser realizado pelo telescópio ASKAP recentemente, atingirá o nível indicado pela curva inferior (sensibilidade de  $\sim 10^{-6}$  Jy), revelando mais de 70 milhões de deteções (imagem por R. Carvajal, IA/FCUL).

## Referências

- Abel T., Bryan G. L., Norman M. L., 2000, "The Formation and Fragmentation of Primordial Molecular Clouds", *The Astrophysical Journal* 540, 39. doi:10.1086/309295
- Afonso, J., Casanellas, J., Prandoni, I., et al. 2015, "Identifying the first generation of radio powerful AGN in the Universe with the SKA", in *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array*, Proceedings of Science (AASKA14), 71
- Aird, J., Comastri, A., Brusa, M., et al., 2013, "The Hot and Energetic Universe: The formation and growth of the earliest supermassive black holes", supporting White Paper for the ESA science theme "The Hot and Energetic Universe", arXiv, arXiv:1306.2325
- Amarantidis, S., Afonso, J., Messias, H., et al. 2019, "The first supermassive black holes: indications from models for future observations", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 485, 2694. doi:10.1093/mnras/stz551
- Bañados E., Venemans B. P., Decarli R., et al., 2016, "The Pan-STARRS1 Distant  $z > 5.6$  Quasar Survey: More than 100 Quasars within the First Gyr of the Universe", *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 227, 11. doi:10.3847/0067-0049/227/1/11
- Bañados E., Carilli C., Walter F., et al., 2018, "A Powerful Radio-loud Quasar at the End of Cosmic Reionization", *Astrophysical Journal Letters*, 861, L14. doi:10.3847/2041-8213/aac511
- Bañados E., Mazzucchelli C., Momjian E., et al., 2021, "The Discovery of a Highly Accreting, Radio-loud Quasar at  $z = 6.82$ ", *The Astrophysical Journal*, 909, 80. doi:10.3847/1538-4357/abe239
- Bouwens R. J., Oesch P. A., Labbé I., et al., 2016, "The Bright End of the  $z \sim 9$  and  $z \sim 10$  UV Luminosity Functions Using All Five CANDELS Fields", *Astrophysical Journal*, 830, 67. doi:10.3847/0004-637X/830/2/67
- Bromm V., Coppi P. S., Larson R. B., 2002, "The Formation of the First Stars. I. The Primordial Star-forming Cloud", *The Astrophysical Journal* 564, 23. doi:10.1086/323947
- Bromm V., Loeb A., 2003, "Formation of the First Supermassive Black Holes", *The Astrophysical Journal* 596, 34. doi:10.1086/377529
- Carilli C. L., Furlanetto S., Briggs F., et al., 2004, "Probing the dark ages with the Square Kilometer Array", *New Astronomy Reviews* 48, 1029. doi:10.1016/j.newar.2004.09.046
- Carr B. J., 2003, "Primordial Black Holes as a Probe of Cosmology and High Energy Physics", *Quantum Gravity: From Theory to Experimental Search*, 301. doi:10.1007/978-3-540-45230-0\_7
- De Rosa G., Venemans B. P., Decarli R., et al., 2014, "Black Hole Mass Estimates and Emission-line Properties of a Sample of Redshift  $z > 6.5$  Quasars", *The Astrophysical Journal*, 790, 145. doi:10.1088/0004-637X/790/2/145
- Devecchi B., Volonteri M., Colpi M., Haardt F., 2010, "High-redshift formation and evolution of central massive objects - I. Model description", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 409, 1057. doi:10.1111/j.1365-2966.2010.17363.x
- Devecchi B., Volonteri M., Rossi E.~M., et al., 2012, "High-redshift formation and evolution of central massive objects - II. The census of BH seeds", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 421, 1465. doi:10.1111/j.1365-2966.2012.20406.x
- Finkelstein S. L., Ryan R. E., Papovich C., et al., 2015, "The Evolution of the Galaxy Rest-frame Ultraviolet Luminosity Function over the First Two Billion Years", *The Astrophysical Journal* 810, 71. doi:10.1088/0004-637X/810/1/71
- Fryer C. L., Woosley S. E., Heger A., 2001, "Pair-Instability Supernovae, Gravity Waves, and Gamma-Ray Transients", *The Astrophysical Journal* 550, 372. doi:10.1086/319719
- Huynh M. T., Norris R. P., Siana B., Middelberg E., 2010, "Evidence for Infrared-faint Radio Sources as  $z > 1$  Radio-loud Active Galactic Nuclei", *The Astrophysical Journal*, 710, 698. doi:10.1088/0004-637X/710/1/698
- Jarvis M. J., Teimourian H., Simpson C., et al., 2009, "The discovery of a typical radio galaxy at  $z = 4.88$ ", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 398, L83. doi:10.1111/j.1745-3933.2009.00715.x
- Jiang L., Kashikawa N., Wang S., et al., 2021, "Evidence for GN-z11 as a luminous galaxy at redshift 10.957", *Nature Astronomy*, 5, 256. doi:10.1038/s41550-020-01275-y
- Ker L. M., Best P. N., Rigby E. E., et al., 2012, "New insights on the  $z$ - $\alpha$  correlation from complete radio samples" *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 420, 2644. doi:10.1111/j.1365-2966.2011.20235.x
- Mayer L., Kazantzidis S., Escala A., Callegari S., 2010, "Direct formation of supermassive black holes via multi-scale gas inflows in galaxy mergers", *Nature*, 466, 1082. doi:10.1038/nature09294
- Mortlock D. J., Warren S. J., Venemans B. P., et al., 2011, "A luminous quasar at a redshift of  $z = 7.085$ ", *Nature*, 474, 616. doi:10.1038/nature10159
- Miley G., De Breuck C., 2008, "Distant radio galaxies and their environments", *Astronomy and Astrophysics Review* 15, 67. doi:10.1007/s00159-007-0008-z
- Nandra K., Barret D., Barcons X., et al., 2013, "The Hot and Energetic Universe: A White Paper presenting the science theme motivating the Athena+ mission", White Paper for the ESA science theme "The Hot and Energetic Universe", arXiv, arXiv:1306.2307
- Norris R. P., Afonso J., Appleton P. N., et al., 2006, "Deep ATLAS Radio Observations of the Chandra Deep Field-South/Spitzer Wide-Area Infrared Extragalactic Field", *The Astronomical Journal*, 132, 2409. doi:10.1086/508275
- Norris R. P., Hopkins A. M., Afonso J., et al., 2011, "EMU: Evolutionary Map of the Universe", *Publications of the Astronomical Society of Australia* 28, 215. doi:10.1071/AS11021
- Oesch P. A., Brammer G., van Dokkum P. G., et al., 2016, "A Remarkably Luminous Galaxy at  $z=11.1$  Measured with

Hubble Space Telescope Grism Spectroscopy”, *Astrophysical Journal*, 819, 129. doi:10.3847/0004-637X/819/2/129

Stacy A., Greif T. H., Bromm V., 2012, “The first stars: mass growth under protostellar feedback”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 422, 290. doi:10.1111/j.1365-2966.2012.20605.x

Turk M. J., Abel T., O’Shea B., 2009, “The Formation of Population III Binaries from Cosmological Initial Conditions”, *Science* 325, 601. doi:10.1126/science.1173540

Vogelsberger M., Marinacci F., Torrey P., Puchwein E., 2020, “Cosmological simulations of galaxy formation”, *Nature Reviews Physics* 2, 42. doi:10.1038/s42254-019-0127-2

Wang F., Yang J., Fan X., et al., 2021, “A Luminous Quasar at Redshift 7.642”, *Astrophysical Journal Letters*, 907, L1. doi:10.3847/2041-8213/abd8c6



José Afonso, é investigador na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e no Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço. Possui uma licenciatura em Física (1996) e um Mestrado em Astronomia e Astrofísica (1998) pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, e um doutoramento em Astrofísica (2002) pelo Imperial College de Londres. Estudou formação e evolução de galáxias no *Space Telescope Science Institute* (EUA), *Australia Telescope National Facility*, no *Onsala Space Observatory* (Suécia) e mais tarde em Portugal. Coordenou o Centro de Astronomia e Astrofísica da Universidade de Lisboa entre 2011 e 2015, tendo ajudado a fundar o Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço, que coordenou até 2021. Atualmente procura ajudar a definir a próxima geração de observações astronómicas para a deteção dos primeiros buracos negros no Universo, participando no desenvolvimento de alguns dos instrumentos astronómicos mais revolucionários para os próximos anos, entre os quais o espectrógrafo *Multi-Object Optical and Near-infrared Spectrograph*, a instalar no *Very Large Telescope* em 2022, e a câmara *Wide-Field Imager* para o futuro telescópio de Raios-X Athena, da ESA, que será lançado por volta de 2032. Gosta de divulgar as maravilhas da Astronomia e despertar novas mentes para a Ciência.