

	VIETTEL AI RACE	TD094
	Vũ Trụ Học Tính Toán	Lần ban hành: 1

1. Giới thiệu

Vũ trụ học tính toán là lĩnh vực liên ngành kết hợp vật lý thiên văn, toán học, khoa học máy tính và trí tuệ nhân tạo để giải mã lịch sử hình thành và tiến hóa của vũ trụ. Nếu kính thiên văn cho chúng ta hình ảnh của bầu trời như nó hiện ra hôm nay, thì vũ trụ học tính toán cho phép “tua ngược thời gian”, tái dựng những giai đoạn sớm nhất của vũ trụ từ sau Vụ Nổ Lớn (Big Bang), đồng thời dự đoán tương lai hàng chục tỷ năm tới.

Các mô phỏng này tái hiện sự giãn nở không gian, tương tác của vật chất tối, năng lượng tối, và khí baryon để trả lời các câu hỏi cốt lõi: Làm thế nào các thiên hà đầu tiên hình thành? Vì sao chúng phân bố thành mạng lưới vũ trụ (cosmic web) không lòi? Và tương lai của vũ trụ – dần nở vô hạn hay co sụp – sẽ ra sao?

2. Bối cảnh lịch sử

- Thập niên 1960–1980: Các mô phỏng đầu tiên chỉ xử lý vài trăm đến vài nghìn hạt, tập trung vào sự hình thành cụm thiên hà.
- Thập niên 1990: Sự phát triển của siêu máy tính cho phép mô phỏng hàng triệu hạt, lần đầu tiên thể hiện mạng lưới vũ trụ giống quan sát thực.
- Thế kỷ 21: Các dự án như Millennium Simulation và Illustris nâng quy mô lên hàng chục tỷ hạt, mô tả chi tiết hình thành thiên hà, lỗ đen siêu nặng, và luồng gió thiên hà.
- Hiện nay: Với sức mạnh exascale (10^{18} phép tính/giây), mô phỏng có thể đồng thời theo dõi cấu trúc vĩ mô và các quá trình vi mô như sự hình thành sao, bùng nổ siêu tân tinh, và phản hồi của lỗ đen.

3. Công nghệ và phương pháp

- Phương trình Einstein: Mô tả sự giãn nở không gian-thời gian và ảnh hưởng của năng lượng tối.

	VIETTEL AI RACE	TD094
	Vũ Trụ Học Tính Toán	Lần ban hành: 1

- Mô phỏng N-body: Tính toán lực hấp dẫn giữa hàng tỷ “hạt” đại diện cho cụm vật chất tối và thiên hà.
- Thủy động lực học vũ trụ (Cosmological Hydrodynamics): Giải phương trình Navier–Stokes cho khí baryon, mô phỏng quá trình làm mát, hình thành sao, và gió thiên hà.
- Thuật toán đa tỷ lệ: Kết hợp độ phân giải cao cho vùng thiên hà nhỏ và độ phân giải thấp cho không gian rộng để cân bằng độ chính xác và chi phí.
- AI và Machine Learning: Tăng tốc mô phỏng, nén dữ liệu, và nhận dạng mẫu trong hàng petabyte dữ liệu.

4. Học máy trong Vũ trụ học

Học máy là một lĩnh vực phát triển nhanh chóng và có tiềm năng tạo ra bước đột phá trong nghiên cứu vũ trụ học. Bằng cách áp dụng các thuật toán học máy vào các bộ dữ liệu khổng lồ, các nhà nghiên cứu có thể rút ra những hiểu biết và mô hình mà phương pháp truyền thống khó hoặc không thể phát hiện.

4.1 Giới thiệu về Học máy trong Vũ trụ học

Trong vũ trụ học, học máy thường bao gồm việc sử dụng các thuật toán học có giám sát hoặc không giám sát để phân tích các tập dữ liệu lớn.

Học có giám sát: Huấn luyện mô hình trên tập dữ liệu đã gắn nhãn, nơi các nhãn là những đại lượng đã biết như tham số vũ trụ học hoặc đặc tính của thiên hà.

Học không giám sát: Tìm kiếm các mẫu hoặc cấu trúc trong dữ liệu mà không cần biết trước các nhãn.

Một trong những ứng dụng chính của học máy trong vũ trụ học là ước lượng các tham số vũ trụ học từ các tập dữ liệu lớn. Ví dụ, các thuật toán học máy có thể được dùng để phân tích sự phân bố của các thiên hà hoặc các đặc tính của bức xạ phông vi sóng vũ trụ (CMB) nhằm suy ra giá trị của các tham số như hằng số Hubble hoặc mật độ vật chất tối.

4.2 Ứng dụng của Học máy trong Ước lượng Tham số Vũ trụ học

	VIETTEL AI RACE	TD094
	Vũ Trụ Học Tính Toán	Lần ban hành: 1

Học máy đã được áp dụng cho nhiều loại dữ liệu vũ trụ khác nhau, bao gồm bức xạ phông vi sóng vũ trụ, khảo sát thiên hà và quan sát thấu kính hấp dẫn. Một số ví dụ tiêu biểu:

Ước lượng tham số vũ trụ học: Sử dụng thuật toán học máy để ước lượng các tham số như hằng số Hubble, mật độ vật chất tối và mật độ năng lượng tối.

Phân loại thiên hà: Phân loại các thiên hà theo loại, chẳng hạn như thiên hà xoắn ốc hay thiên hà elip.

Phân tích thấu kính hấp dẫn: Phân tích đặc tính của các hệ thấu kính hấp dẫn, như phân bố khối lượng của các thiên hà đóng vai trò thấu kính.

4.3 Hướng phát triển trong tương lai cho Học máy trong Vũ trụ học

Việc ứng dụng học máy vào vũ trụ học đang phát triển nhanh với nhiều triển vọng thú vị:

Kết hợp học máy với phương pháp truyền thống: Học máy có thể kết hợp với các phương pháp truyền thống như suy luận Bayes để nâng cao độ chính xác và độ tin cậy trong ước lượng tham số vũ trụ học.

Phân tích các bộ dữ liệu mới: Ứng dụng học máy cho các bộ dữ liệu sắp có như Square Kilometre Array (SKA) hay Kính thiên văn Khảo sát Bầu trời Lớn (LSST) để khám phá những mẫu hình và hiểu biết mới.

Phát triển thuật toán học máy mới: Thiết kế các thuật toán học máy được tối ưu hóa riêng cho nhu cầu của vũ trụ học, chẳng hạn như phân tích cấu trúc quy mô lớn hoặc nghiên cứu đặc tính của bức xạ phông vi sóng vũ trụ.

5. Siêu máy tính và dự án tiêu biểu

- Illustris & IllustrisTNG: Mô phỏng hơn 30 tỷ hạt trong khối lập phương rộng 300 triệu năm ánh sáng, tái hiện chi tiết quá trình từ Big Bang tới hiện tại.
- Millennium Simulation: Điểm mốc quan trọng trong việc nghiên cứu vai trò của vật chất tối và sự hình thành mạng lưới vũ trụ.

	VIETTEL AI RACE	TD094
	Vũ Trụ Học Tính Toán	Lần ban hành: 1

- Frontier (Mỹ) & Fugaku (Nhật): Siêu máy tính exascale cho phép giải các mô hình vật lý phức tạp với độ chính xác chưa từng có, mở đường cho việc mô phỏng toàn bộ lịch sử vũ trụ với độ phân giải cao.

6. Ứng dụng khoa học

- Giải mã vật chất tối và năng lượng tối: So sánh mô phỏng với quan sát (như dữ liệu từ Kính James Webb, Euclid) để ước tính tỷ lệ và tính chất của các thành phần bí ẩn này.
- Dự báo quan sát thiên văn: Giúp các nhà thiên văn lên kế hoạch cho các chiến dịch quan sát, tối ưu vị trí đặt kính và thời điểm chụp.
- Nguồn gốc lỗ đen siêu nặng: Tái hiện quá trình các hạt khí sụp đổ thành lỗ đen không lồ ở tâm thiên hà.
- Hình thành mạng lưới vũ trụ: Giải thích vì sao các thiên hà không phân bố đều mà kết thành sợi, nút, và khoảng trống khổng lồ.

7. Thách thức

- Khối lượng dữ liệu khổng lồ: Một mô phỏng hiện đại tạo ra hàng petabyte dữ liệu, đòi hỏi hệ thống lưu trữ và thuật toán nén tiên tiến.
- Độ chính xác mô hình: Cần cân bằng giữa quy mô vũ trụ (hàng tỷ năm ánh sáng) và các quá trình nhỏ như bùng nổ siêu tân tinh.
- Chi phí tính toán: Một mô phỏng quy mô lớn có thể tiêu tốn hàng triệu giờ CPU và hàng triệu USD chi phí vận hành.
- Kết hợp dữ liệu quan sát: Việc đồng bộ với những phát hiện mới từ các kính thiên văn thế hệ tiếp theo (JWST, SKA) đòi hỏi mô hình linh hoạt.

8. Tác động và tương lai

	VIETTEL AI RACE	TD094
	Vũ Trụ Học Tính Toán	Lần ban hành: 1

- Kiến thức vũ trụ sâu hơn: Kiểm chứng hoặc bác bỏ các giả thuyết như Vũ trụ lạm phát, Big Rip, hoặc đa vũ trụ.
- Giáo dục và phổ biến khoa học: Tạo phim 3D, thực tế ảo cho phép “du hành” trong mô phỏng vũ trụ, giúp công chúng hiểu về Big Bang và cấu trúc thiên hà.
- Hợp tác liên ngành: Thúc đẩy phát triển thuật toán tính toán song song, lưu trữ dữ liệu khổng lồ, và trí tuệ nhân tạo.
- Exascale và máy tính lượng tử: Kết hợp siêu máy tính exascale với điện toán lượng tử sẽ mở đường cho mô phỏng từng hạt nguyên tử trong thời kỳ vũ trụ sơ khai.