

# 차세대의 우주론적 유체역학 수치실험 'DARWIN' 수행을 통한 왜소은하의 형성기원 규명

신 지 혜

# 초고성능컴퓨팅 활용 고도화사업

<주무부처> 과학기술정보통신부

<전문기관> 한국연구재단

□ 사업명 : 초고성능컴퓨팅 활용 고도화

□ 사업목적 : 초고성능컴퓨팅을 활용한 초거대 데이터·시뮬레이션 기반의 대형·집단연구 지원을 통해 과학난제 해결 및 혁신기술 창출

□ 사업내용 : 국가초고성능컴퓨팅 10대 전략 분야\*에서 초고성능컴퓨팅 기술을 활용하여 그간의 난제를 해결하거나 성과를 획기적으로 제고할 수 있는 연구 지원

\* ① 소재·나노 ② 생명·보건 ③ ICT ④ 기상·기후·환경 ⑤ 자율주행  
⑥ 우주 ⑦ 핵융합·가속기 ⑧ 제조기반기술 ⑨ 재난·재해 ⑩ 국방·안보

□ 사업기간/예산 : '22년~'27년 / 470억원 ('22년 10억원)

➔ 과제당 총 45억원: 1년당 10억원 (사업기간: 4년 6개월)

# 초고성능컴퓨팅 활용 고도화사업 추진 전략

◆ 파급력 높은 대표성과 창출을 위해 지원과제를 전략화(Top-down)하고, 특화 자원 및 응용SW 등 과제별 맞춤형 지원체계 구축

- (지원과제 전략화) 관련 부처·전문가 등을 통해 전략성이 높은 연구주제 선정 후 문제정의, 연구 목표·내용 등 상세기획 실시
  - 기존 실험중심 연구방식으로는 수행할 수 없는 초거대 계산·데이터 기반 연구 수행으로 과학난제 해결
  - 페타스케일 이상 초고성능컴퓨팅 자원을 활용할 수 있는 시뮬레이션·인공지능·데이터분석 기술 개발
  - 거대규모의 복잡한 계산 수행의 기술적 장벽을 해결하기 위한 초고성능컴퓨팅 기반 활용기술(거대병렬화, 인공지능, 데이터분석 등)
- (과제별 맞춤형 지원) 각 과제별로 연구수행에 최적화된 초고성능컴퓨팅자원 및 응용SW 서비스·개발인력 등을 매칭 지원
  - 국가센터·전문센터 등의 초고성능컴퓨팅 자원과 응용 SW 기술 지원
  - 초고성능컴퓨팅 활용 연구 수행 시 발생하는 기술적 장벽을 예상하고 해결책을 개발하는 선제적 지원
  - 응용연구자와 SW개발자가 공동으로 참여하여 발생 가능한 문제 정의부터 해결책 도출까지 필요한 기술을 개발하고 적용



# Numerical Galaxy Formation 미니 워크샵 멤버

## Numerical Galaxy Formation Mini-Workshop

January 16, 2020

Seoul National University, Building 56, Room 521

첫번째 워크샵 - 2020.1.16

## Numerical Galaxy Formation Mini-Workshop

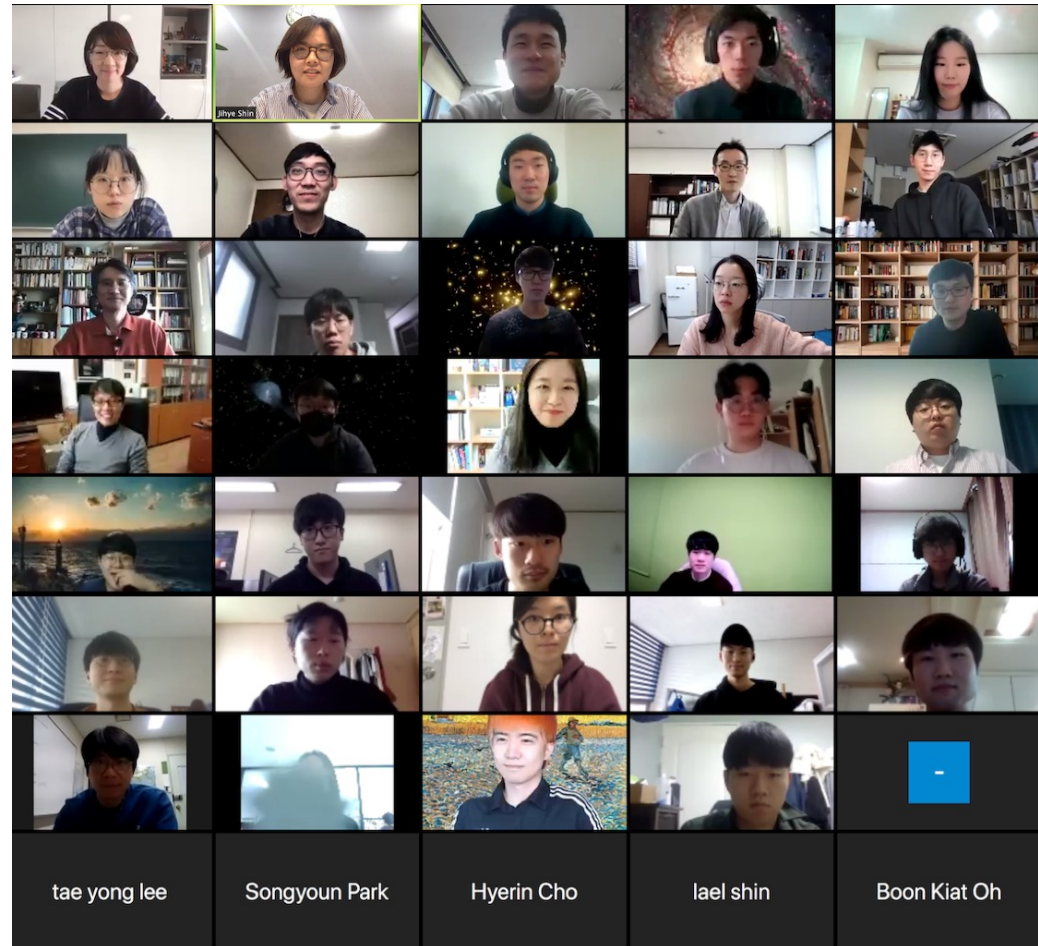
2021. 1. 28. Thursday

두번째 워크샵 - 2021.1.28

## Numerical Galaxy Formation Mini-Workshop

2022. 1. 25. Tuesday

세번째 워크샵 - 2022. 1.25

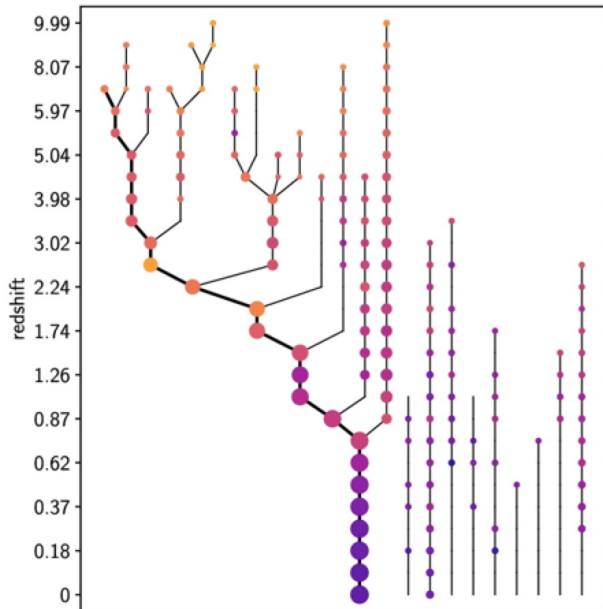


➔ 김용휘, 김지훈, 김주한, 김태선, 신지혜, 송현미, 이재현, 전명원, 최이나 & 권오경(KISTI)

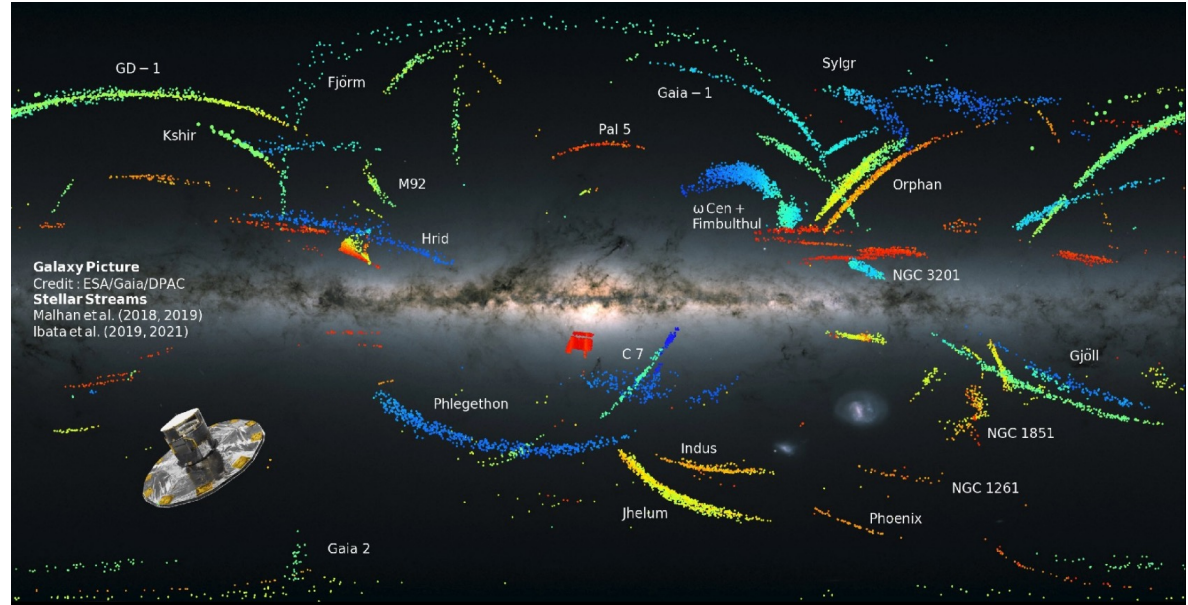


# 왜소은하 연구의 필요성

## 표준우주모형의 유효성 검증을 위한 실마리를 제공하는 왜소은하



표준우주모형의 계층적 병합 이론



우리은하에 병합된 다양한 왜소은하의 조석꼬리 흔적

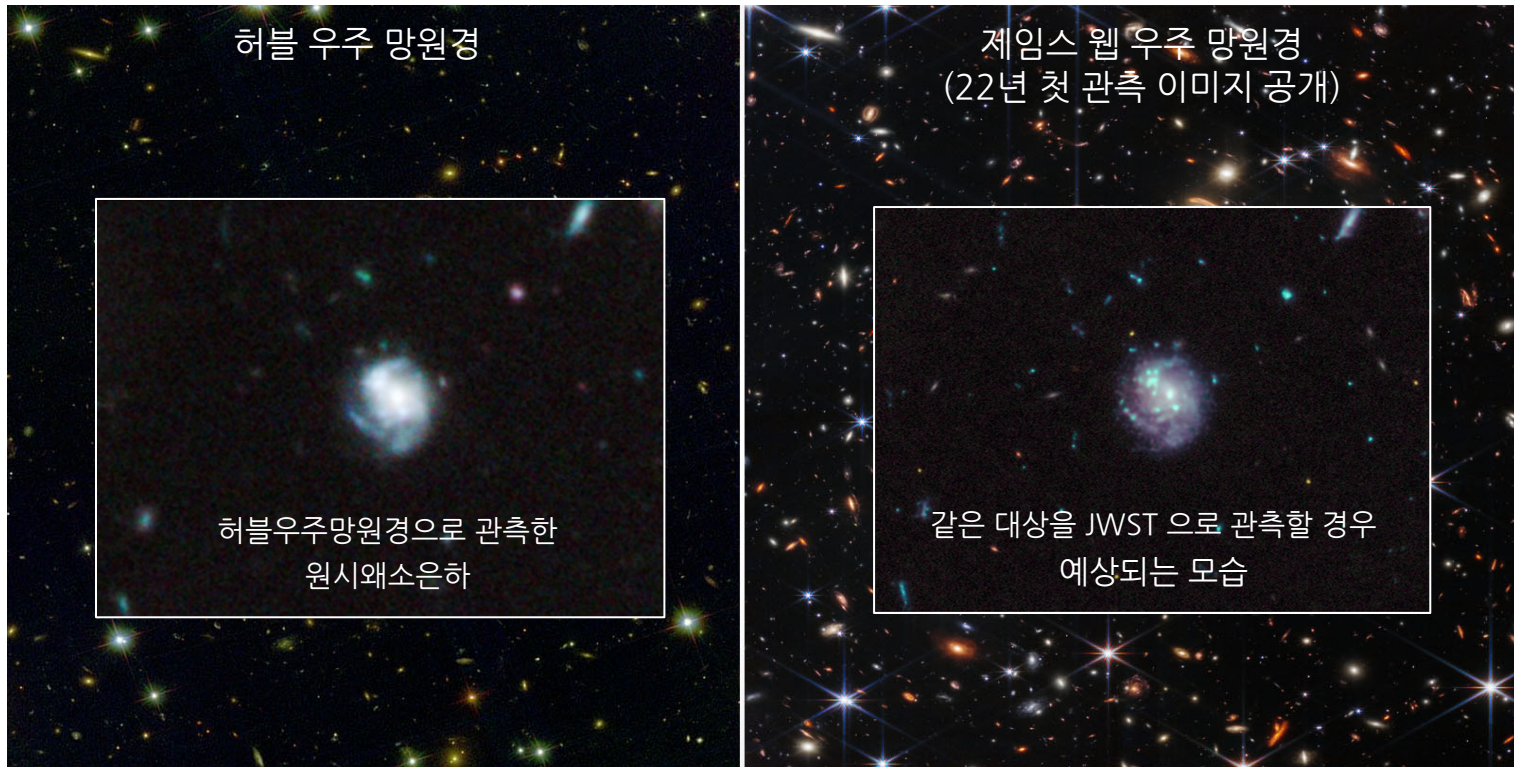
- 은하천문학: 우주의 기원과 구조를 이해하는 데에 핵심적 역할
- 왜소은하들은 무거운 은하( $>10^{10}M_{\text{sun}}$ )들에 비해 유효반경-질량 관계에 큰 편차를 가짐: **다양한 기원**
- 은하 진화 과정을 좌우하는 **미시적/거시적 물리 현상의 영향이 극대화**되는 천체
- 왜소은하의 관측된 특성은 **표준우주모형의 유효성에 중요한 근본 질문을 제기**

➔ **표준우주모형이 해결해야 할 중대한 도전 과제**

# 왜소은하 연구의 필요성

## 차세대 망원경의 핵심 관측 대상으로 손꼽히는 왜소은하

- 우주거대구조가 은하에 주는 영향, 우주 물질 분포의 진화, 암흑물질의 특성 이해를 위한 실마리 제공
- 수적으로는 가장 풍부한 은하이지만, 낮은 총밝기로 인해 먼 우주에서의 관측이 매우 어려움
- 제임스 웹 우주 망원경(JWST): 초기 우주의 원시 왜소은하도 관측 가능



➔ 우주 구조의 기초 요소인 왜소은하 연구의 새 장이 열리고 있음



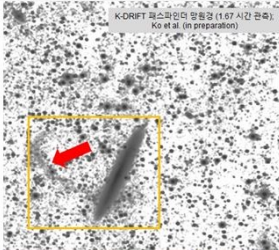
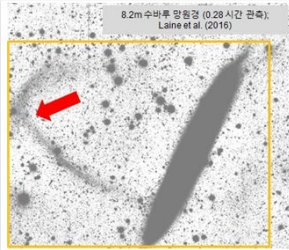
# 왜소은하 연구의 필요성

차세대 망원경의 핵심 관측 대상으로 손꼽히는 왜소은하





### K-DRIFT

|                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p style="font-size: small;">K-DRIFT 포스트모던 망원경 (1.67 시간 관측)<br/>Ko et al. (in preparation)</p> |  <p style="font-size: small;">8.2m 수퍼루프 망원경 (0.28 시간 관측)<br/>Laine et al. (2016)</p> |
|  <p style="text-align: center;">K-DRIFT 시험모델</p>                                               |  <p style="text-align: center;">스바루 (Subaru)</p>                                    |
| 구경: 0.3m                                                                                                                                                                           | 구경: 8.2m                                                                                                                                                                 |
| 노출시간: 6,000초                                                                                                                                                                       | 노출시간: 1,000초                                                                                                                                                             |

근 우주의 극미광 왜소은하

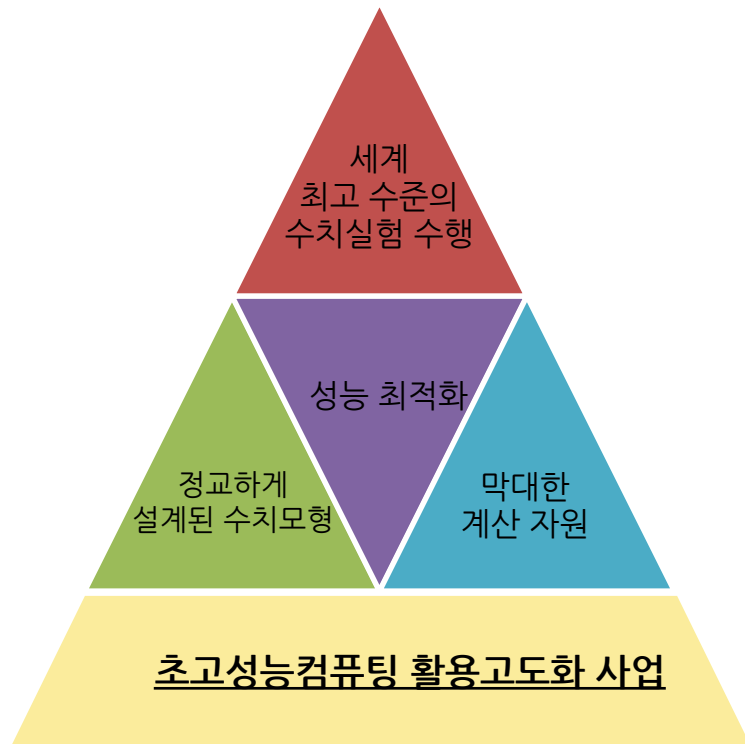


# 왜소은하 시뮬레이션 연구의 필요성

## 왜소은하의 형성기원 규명을 위한 필요조건 - 우주론적 유체역학 수치실험

- 왜소은하 형성/진화의 이론적 토대를 마련하여 차세대 관측 데이터를 해석
- 초고해상도 분해능 + 최신의 초정밀 바리온 물리 + 우주론적 규모 공간 : 은하 진화 연구의 가장 도전적인 과제

### → 세계 최고 수준의, 차세대 우주론적 유체역학 수치실험



- 국내 은하 시뮬레이션 & HPC 전문가의 기밀한 협력
- 세계 최대 규모 수치실험의 지적 자산 활용
- 누리온에 최적화된 수치모형 활용 (정밀성/효율성 검증)
- 차세대 초병렬 계산자원에 대응하도록 GPU병렬화 적용
- 초고분해능에 걸맞는 최신의 초정밀 바리온 물리 구현
- 전략적으로 설계된 3단계 분해능 수치실험 수행
- 인공지능을 활용하여 정밀성과 통계적 우수성을 동시에 달성

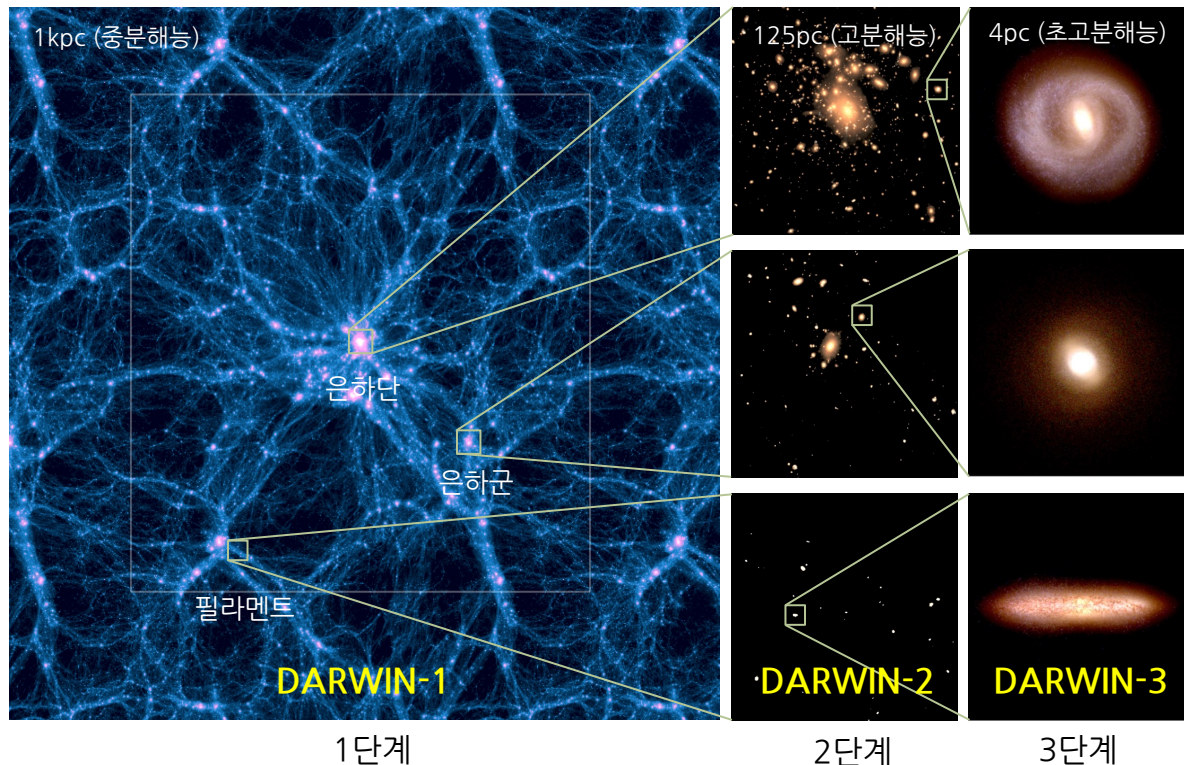
### → 활용고도화 사업에서만 가능한 프로젝트

# 연구개발과제의 최종목표/전략

## 차세대의 우주론적 유체역학 수치실험 'DARWIN' 수행을 통한 왜소은하 형성기원 규명

DARWIN: **DA**zzling **R**ealization of **dW**arf galaxies **I**n the **N**ext generation of cosmological hydrodynamic simulations

- 초고분해능 & 광대역을 동시에 달성 = 3단계의 다중분해능 기법 적용, 인공지능의 결합
- 세계 최고 수준의 분해능에 도달, 최신의 초정밀한 천체물리 & 바리온 물리 구현
- 초고성능컴퓨팅의 경험과 노하우, 초병렬 & GPU병렬 컴퓨팅을 접목하여 엑사스케일 컴퓨팅을 효율적으로 활용



# 세계 최고 수준의 수치실험 사례

The IllustrisTNG project (18, 35, 130 M CPU 시간)



**Volker Springel**

Heidelberg Institute for  
Theoretical Studies → MPA  
PI: Overall TNG Project



**Annalisa Pillepich**

Max Planck Institute for  
Astronomy, Heidelberg  
Co-PI: TNG50 Project



**Rainer Weinberger**

Heidelberg Institute for  
Theoretical Studies → CFA



**Federico Marinacci**

Massachusetts Institute of  
Technology → Bologna



**Mark Vogelsberger**

Massachusetts Institute of  
Technology



**Shy Genel**

Center for Computational  
Astrophysics, Flatiron  
Institute



**Jill Naiman**

Major news: BBC News, New York Times,  
CNN, The Guardian, Washington Post, NBC  
News, Huffington Post, etc.



Technology → Florida

## Acknowledgements:

All of the primary TNG simulations have been run on the Cray XC40 **Hazel Hen** supercomputer at the **High Performance Computing Center Stuttgart** (HLRS) in Germany. They have been made possible by the **Gauss Centre for Supercomputing** (GCS) large-scale project proposals GCS-ILLU and GCS-DWAR.

Publications using TNG: 481 papers until now



→ 국가의 과학기술 경쟁력을 제고

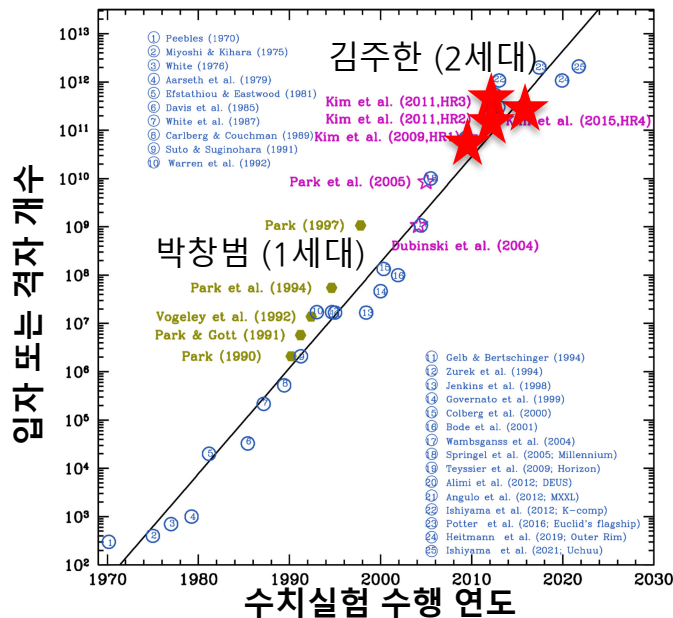


# 본 연구진의 KISTI 슈퍼컴퓨터 활용 역사

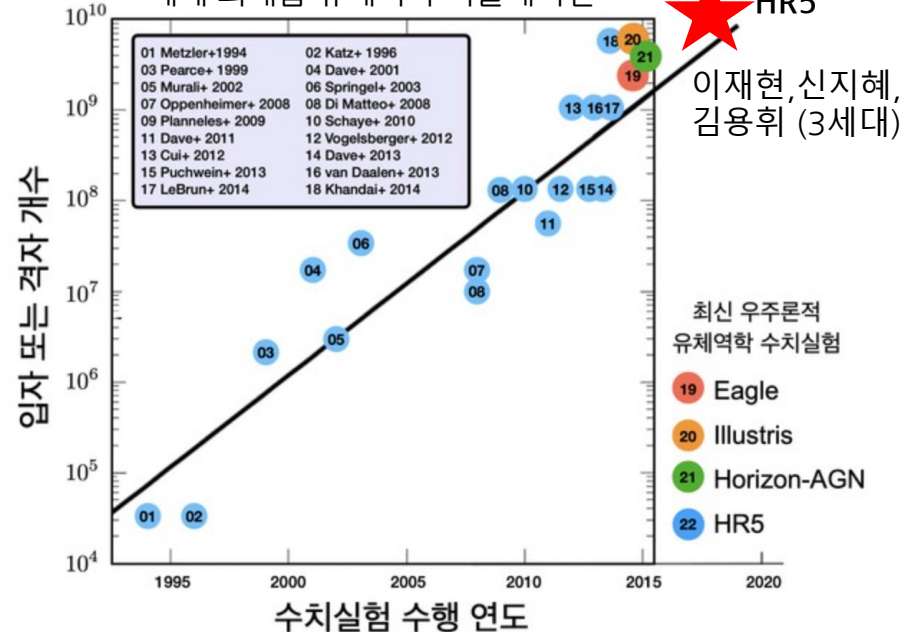
## 본 연구진이 수행한 세계 최대 규모의 우주론적 중력진화/유체역학 시뮬레이션

|                    | HR1                            | HR2&3             | HR4               | HR5                      |
|--------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|
| 논문                 | Kim et al. (2008)              | Kim et al. (2011) | Kim et al. (2015) | Lee & Shin et al. (2021) |
| 수치모형               | GOTPM                          |                   |                   | RAMSES-OMP               |
| 인용횟수               | 86                             | 77                | 55                | 18                       |
| 슈퍼컴퓨터              | <u>Tachyon-I, -II (거대도전과제)</u> |                   |                   | <u>Nurion (혁신지원-거대)</u>  |
| 총계산시간 [core hours] | 1M                             | 4M                | 9.6M              | 38.7 M                   |

세계 최대급 중력진화 시뮬레이션



세계 최대급 유체역학 시뮬레이션



# 연구개발과제의 세부목표 내용

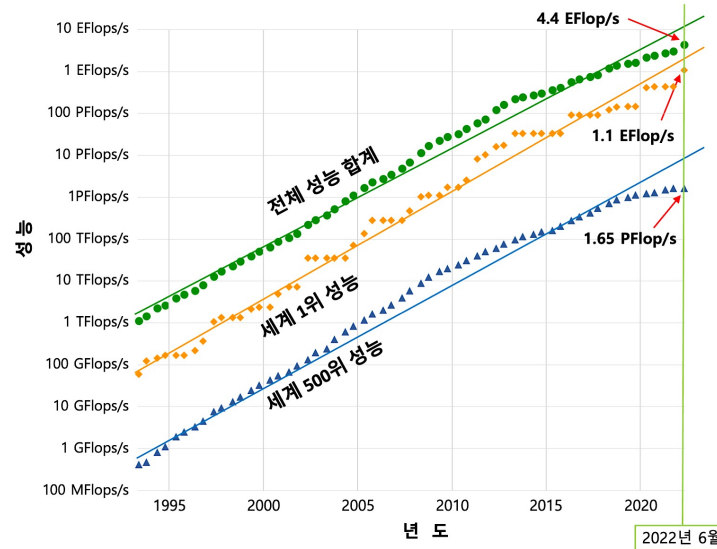
1. 엑사스케일 컴퓨팅에 최적화된 수치모형 개발
2. 은하 형성을 가장 사실적으로 기술할 수 있는 바리온 물리 모듈 개발
3. 세계 최고 수준의 우주론적 유체역학 수치실험 수행
4. 인공지능을 활용한 수치실험 데이터 분석 및 데이터베이스 구축
5. 왜소은하들의 형성 및 진화 과정 규명 연구

# 세부 1 - 엑사스케일 컴퓨팅에 최적화된 수치모형 개발

## 글로벌 슈퍼컴퓨팅 현황



미국 프론티어 슈퍼컴퓨터 (1위)



전세계 슈퍼컴퓨터 성능 변화

슈퍼컴퓨터 CPU+GPU 이중 가속기 1위



미국 서미트 슈퍼컴퓨터 (4위)

- 미국 프론티어(Frontier): 1.1 EFlop/s 성능으로 엑사스케일 장벽을 최초로 넘음
- 미국 서미트(Summit): 148.6PFlop/s 성능, 이중(CPU+GPU) 가속기 1위
- TOP500 시스템에 GPU 가속기 적용: 168대, 그 중 154대가 NVIDIA GPU 이용
- Green 500(에너지 효율성) 지수에서도 GPU 활용한 HPC가 최상위

➔ 슈퍼컴퓨터 6호기는 CPU/GPU 하이브리드 컴퓨터 유력 ➔ GPU 병렬화가 필요



# 세부 1 - 엑사스케일 컴퓨팅에 최적화된 수치모형 개발

## 누리온 & 슈퍼컴퓨터 6호기에 최적화된 모듈 개발 진행

### RAMSES (Teyssier 2002)

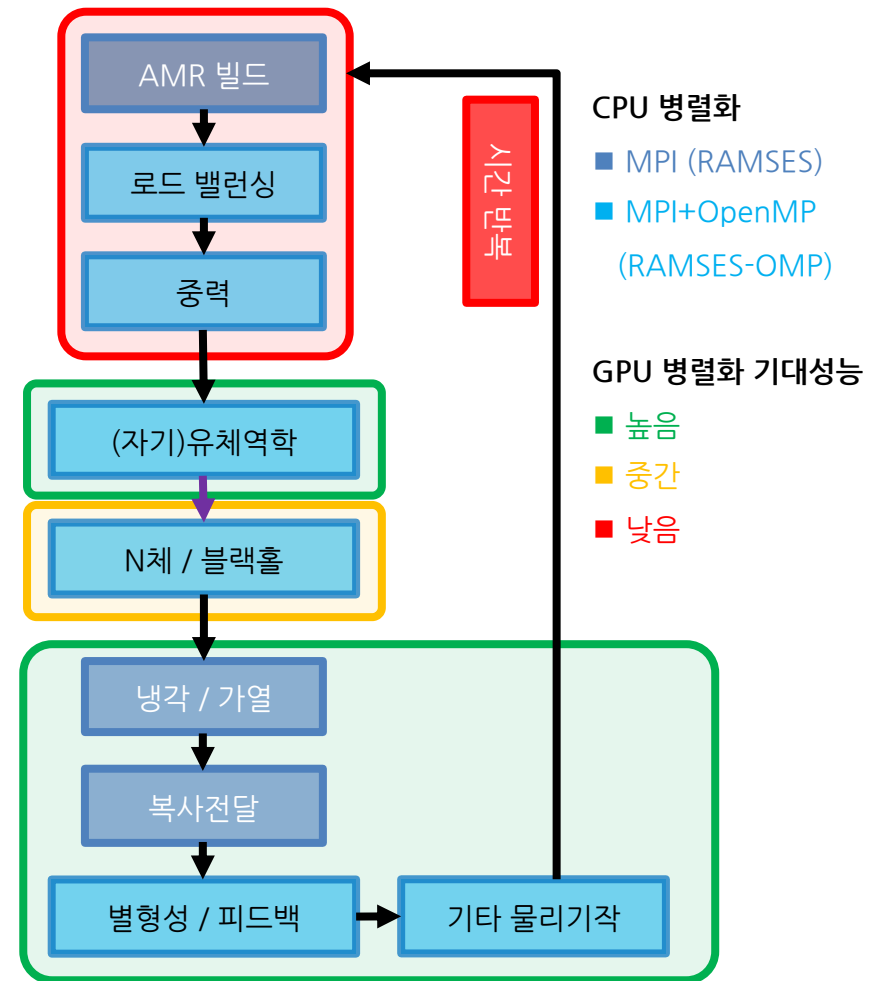
- 오일러 방법론 기반, 적응형 격자 세밀화(AMR)
- MPI 병렬화 수치 모의 실험 코드
- 암흑에너지, 암흑물질, 바리온 및 대부분의 천체물리 기작
- 다양한 실험을 통해 신뢰성/안정성이 입증

### RAMSES-OMP (Updated RAMSES)

- MPI 모듈 최적화 및 OpenMP 모듈 추가 적용 (8.5배)
- 다중 코어, 다중 스레드 시스템(누리온)에 최적화
- 세계 최대규모 우주론적 유체역학 수치실험 HR5

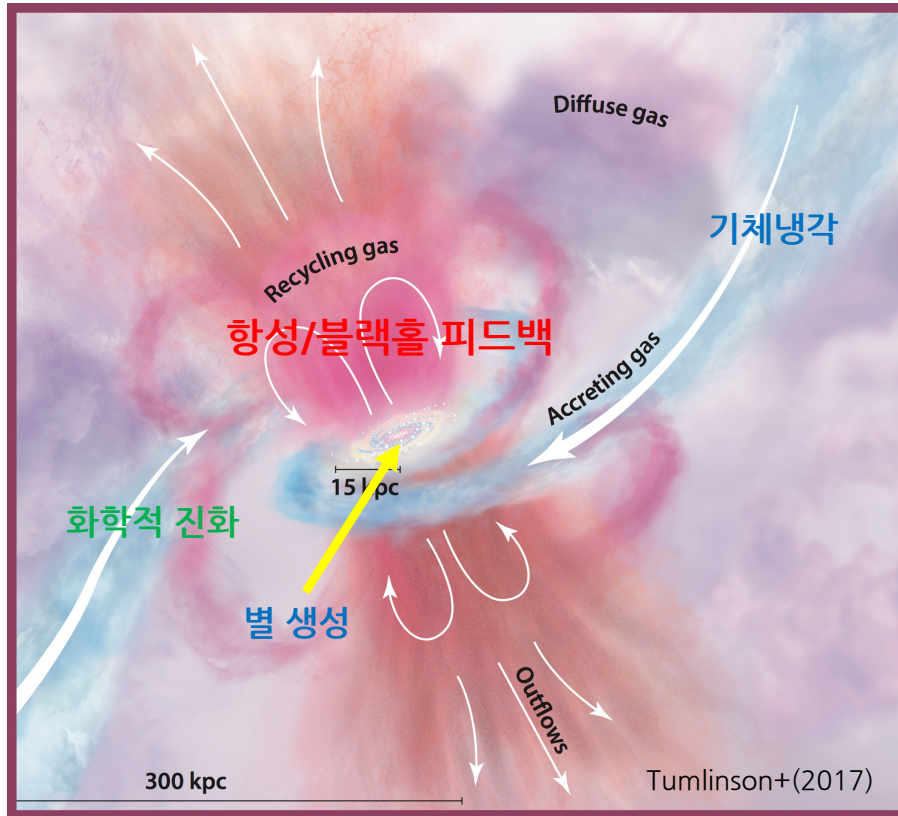
### RAMSES-OMP/CUDA (가칭, 개발 예정)

- 엑사스케일 가속기에 최적화한 코드 개발
- CUDA 라이브러리를 이용한 GPU 병렬화
- MPI + OpenMP + CUDA
- 다중 코어, 다중 스레드, 다중 GPU 가속코어 최적화



# 세부 2 - 은하 형성을 가장 사실적으로 기술할 수 있는 바리온 물리 모듈 개발

## 바리온 물리과정이 유기적으로 연결된 은하 생태계



## 왜소은하의 대표적 과학 난제

1. Missing satellite problem
2. Cusp-core problem
3. Too-big-to-fail problem

## 해결방안

- 정교한 항성/블랙홀 피드백, 사실적인 화학/냉각을 기반으로 왜소은하의 역학적, 화학적, 전자기적 특징을 이해하고 형성 기원을 규명
- 현존하는 실험 중 가장 정교한 바리온 물리 모듈을 포함하여 관측과 비교 가능한 표본들을 다수 제공

→ 최대 수 pc 분해능에서 자기완전적(self-consistent)일 수 있도록,

최신의 바리온 물리 모듈 개발 필요

# 세부 2 - 은하 형성을 가장 사실적으로 기술할 수 있는 바리온 물리 모듈 개발

기체의 열역학적 특성을 반영한 별 생성 모델 탑재  
담당: 김태선 공동연구원 (열역학적 별 생성 모델 개발 노하우 보유)

별 생성

TIGRESS  
Framework에 기반한  
기체 냉각 모델 적용  
담당: 김용휘/이재현 공동연구원  
(TIGRESS framework 및 RAMSES  
물리 모듈 개발 노하우 보유)

기체냉각

정밀한 바리온 물리  
모듈 개발을 통한  
왜소은하 형성 기원  
해결 도전

신뢰도 높은  
항성 피드백 모델 적용  
담당: 김태선 공동연구원  
(역학적 초신성 피드백 모델 개발 및 대형  
국제 협력 연구 내 항성 피드백 모델 개발  
전담)

항성  
피드백

금속성  
피드백

왜소은하에 최적화된  
화학 진화 모델 개발 및  
금속성 피드백 역할 확인  
담당: 전명원 공동연구원  
(화학 진화 모델의 세계적 전문가,  
연관논문 약 20여 편 출판)

블랙홀  
피드백

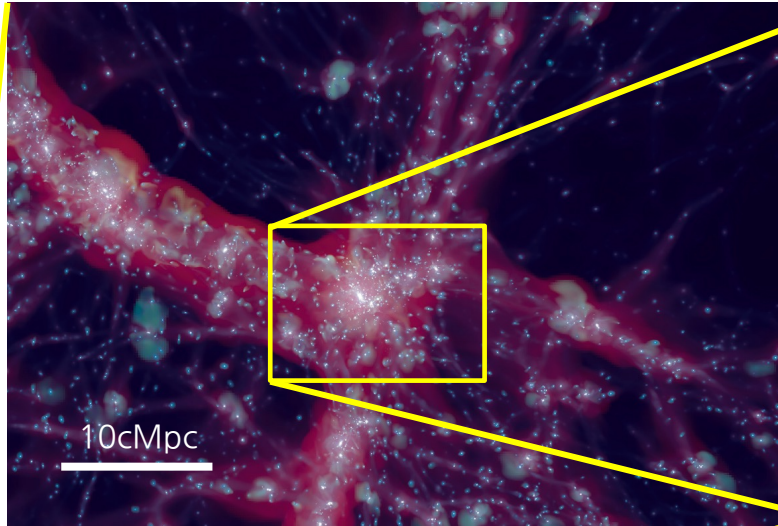
블랙홀의 정확한  
움직임을 고려한  
블랙홀 피드백 개발  
담당: 김지훈/최이나 공동연구원  
(블랙홀 피드백의 세계적 전문가,  
관련 논문 20편 이상 출판)



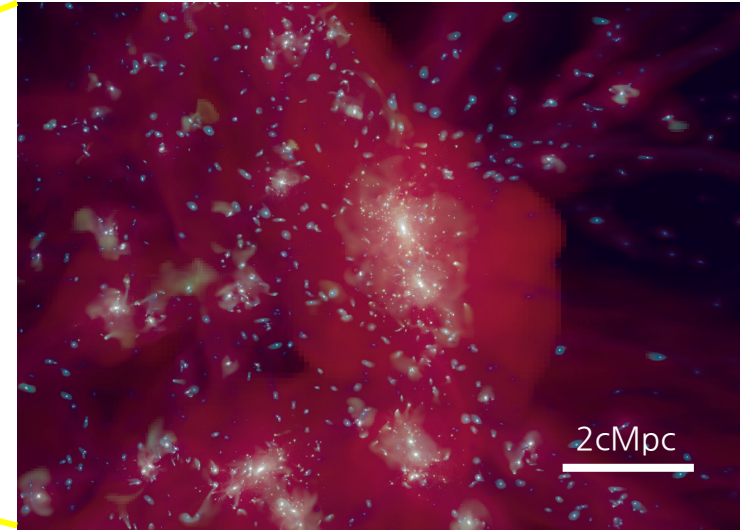
# 세부 3 - 세계 최고 수준의 우주론적 유체역학 수치실험 수행

물질 밀집에 의해 형성되고 우주거대구조의 성장과 함께 진화하는 은하

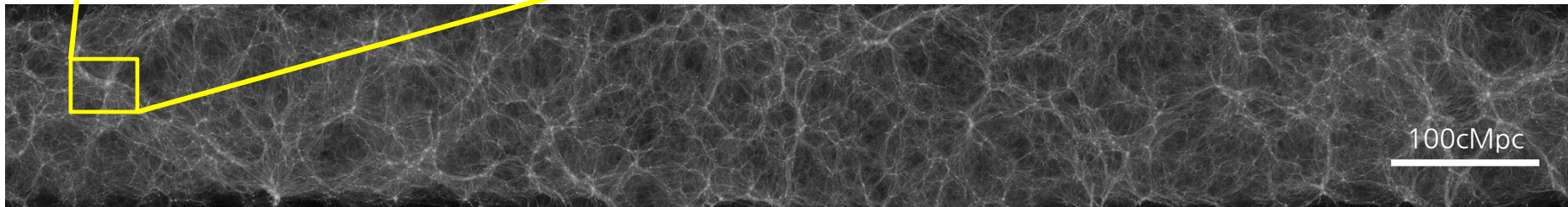
은하단 주변 거대 구조의 바리온의 분포



은하단 내외에서의 바리온 분포



HR5에서 암흑물질 분포로 본 우주 거대 구조



➔ 고립 은하부터 거대 은하단까지 다양한 환경에서 사실적으로 왜소은하 형성과정 모사

# 세부 3 - 세계 최고 수준의 우주론적 유체역학 수치실험 수행

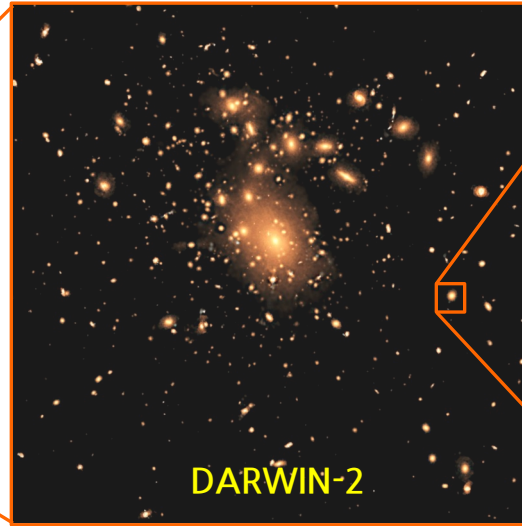
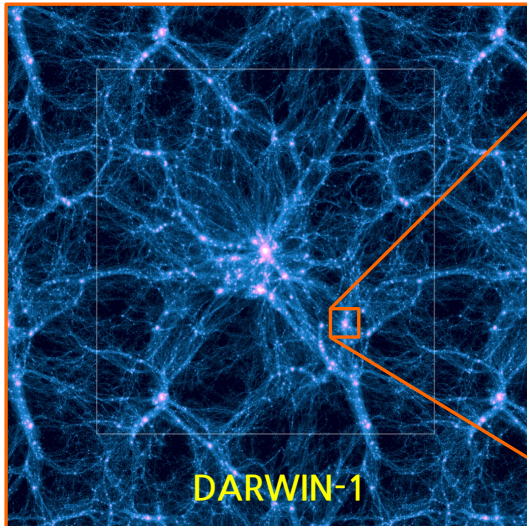
## 전략적으로 설계된 3단계 수치실험 DARWIN

|          | 분해능   | 공간규모                   | 특성                                                                                                                   |
|----------|-------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DARWIN-1 | 1kpc  | (~130Mpc) <sup>3</sup> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 다양한 환경에서 다양한 은하의 형성 및 진화 모사</li> <li>- DARWIN-2 를 위한 후보 영역 탐색</li> </ul>    |
| DARWIN-2 | 125pc | DARWIN-1 에서 선택한 영역     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 고립 은하, 은하군 및 은하단 환경의 왜소은하 구현</li> <li>- DARWIN-3 을 위한 후보 왜소은하 탐색</li> </ul> |
| DARWIN-3 | 4pc   | DARWIN-2 에서 찾은 왜소은하    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 왜소은하 구조 형성 및 성간물질의 초정밀 구현</li> <li>- 왜소은하 난제 해결을 위한 이론적 표본 확보</li> </ul>    |

우주거대구조에서 은하들의 진화 ( $\Delta x \sim 1\text{kpc}$ )

개별 구조물에서 은하의 진화 ( $\Delta x \sim 0.1\text{kpc}$ )

개별 왜소은하의 형성과 진화 ( $\Delta x < 0.01\text{kpc}$ )

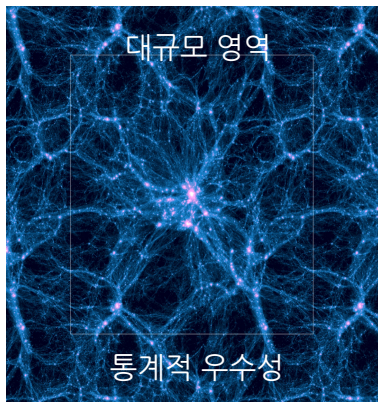


# 세부 4 - 인공지능을 활용한 수치실험 데이터 분석 및 데이터베이스 구축

## 전략적으로 설계된 3단계 수치실험 DARWIN

|          | 분해능   | 공간규모                     | 강점                  | 단점                 |
|----------|-------|--------------------------|---------------------|--------------------|
| DARWIN-1 | 1kpc  | $\sim (130\text{Mpc})^3$ | 통계학적 분석의 우수성        | 왜소은하의 내부를 기술할 수 없음 |
| DARWIN-2 | 125pc | $\sim (30\text{Mpc})^3$  | 왜소은하와 우주구조물의 상관성 연구 | 통계학적 분석의 신뢰도가 낮아짐  |
| DARWIN-3 | 4pc   | $\sim (3\text{Mpc})^3$   | 왜소은하를 가장 사실적으로 구현   | 통계학적 분석을 할 수 없음    |

- 우주의 구조형성에 관해 남아 있는 수많은 질문들: “거대한 규모”와 “높은 분해능” 수치실험이 필수적
- 왜소은하의 통계적 우수성 & 정밀성을 동시에 달성하는 것은 향후 10년 간 불가능
- 현실성 없이 설계된 수치실험은 컴퓨터 자원의 한계에 봉착



- ➔ 인공지능/기계학습 기법을 활용
- ➔ 전통적인 수치실험의 범주를 탈피함
- ➔ 슈퍼컴퓨터의 성능 한계를 극복

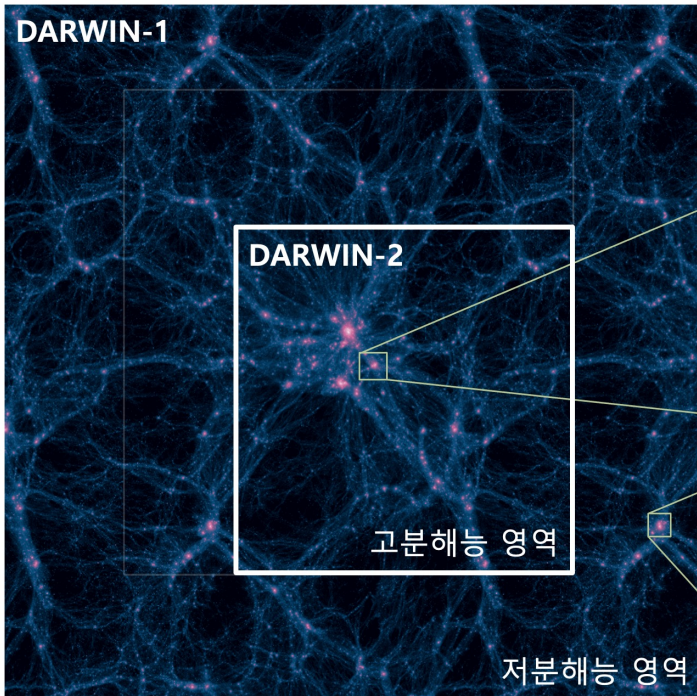


# 세부 4 - 인공지능을 활용한 수치실험 데이터 분석 및 데이터베이스 구축

## 기계학습을 이용한 저분해능 수치실험 결과의 보완

- 소규모 고분해능 수치실험 결과를 학습
- 대규모 수치실험에서 저분해능 영역으로 남겨진 공간에 인공지능의 예측값을 이식
- 사실상의(de facto) 고분해능 수치실험 결과를 도출

다중 분해능 수치실험

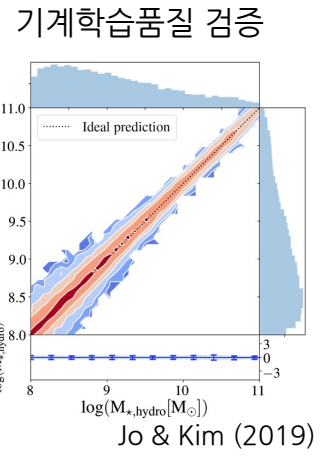


실제수치실험결과

인공지능예측값

저분해능-고분해능  
실험결과를 연관  
짓는 AI 모형

저분해능  
실험결과를  
바탕으로  
고분해능  
결과를 예측



학습된 AI

적용

학습된 AI



# 세부 5 - 왜소은하들의 형성 및 진화 과정 규명 연구

## DARWIN을 이용한 왜소은하 관련 연구 주제

- 왜소은하의 다양성과 우주거대구조와의 상관성 연구
- 의문의 대상인 초밀집 왜소은하와 극미광 왜소은하의 형성기원 연구
- 우리은하 내 왜소은하에 남겨진 최초의 별 흔적 추적
- 초기우주에서의 원시은하와 초거대질량블랙홀의 상호관계 연구
- 조석작용과 유체역학적 효과인 램압력이 왜소은하에 주는 영향
- 우주상에 최초로 생겨나는 별과 은하의 특성 추적
- 은하 내 세부구조에 기체 불안정성이 미치는 영향과 환경적 요인에 인한 점진적 내부 진화 양상
- 왜소은하의 라이만알파 특성 연구 및 관측과의 비교를 위한 방출선 및 흡수선 계산
- 왜소은하의 관측적 특성으로 왜소은하의 형성 과정을 예측하는 인공지능 모델
- 은하와 암흑물질 파워스펙트럼에서 바리온음파진동의 규모 분석 연구

➔ 시뮬레이션 결과로부터 다양한 심화/세부 연구 주제 파생

➔ 관측 전문가와의 협업을 통해 시너지 극대화

# 추진체계

## 수치모형 개발

엑사스케일 컴퓨팅에 대응하는  
고효율/초정밀 우주론 유체역학 수치모형 개발

## 수치실험 수행

세계 최고 수준의 우주론적  
유체역학 수치실험 수행

## 인공지능 활용

인공지능 활용한 수치실험  
분석 및 데이터베이스 구축

## 심층분석 연구

왜소은하들의 형성,  
진화 과정 규명 연구

1차년도

수치모형  
업그레이드

바리온 물리  
모듈 개발

수치실험 설계  
다중분해능 기법 개발  
초기조건 생성

2차년도

1) 초병렬화  
2) GPU 병렬화

1) 모듈 개발  
2) 파라미터 서치

인공지능 훈련용 저분해능 수치실험

분석도구 개발

3차년도

성능최적화

최종 테스트 수치실험

인공지능 모델개발

4차년도

3단계의  
DARWIN 수행

인공지능 모델적용

데이터 분석

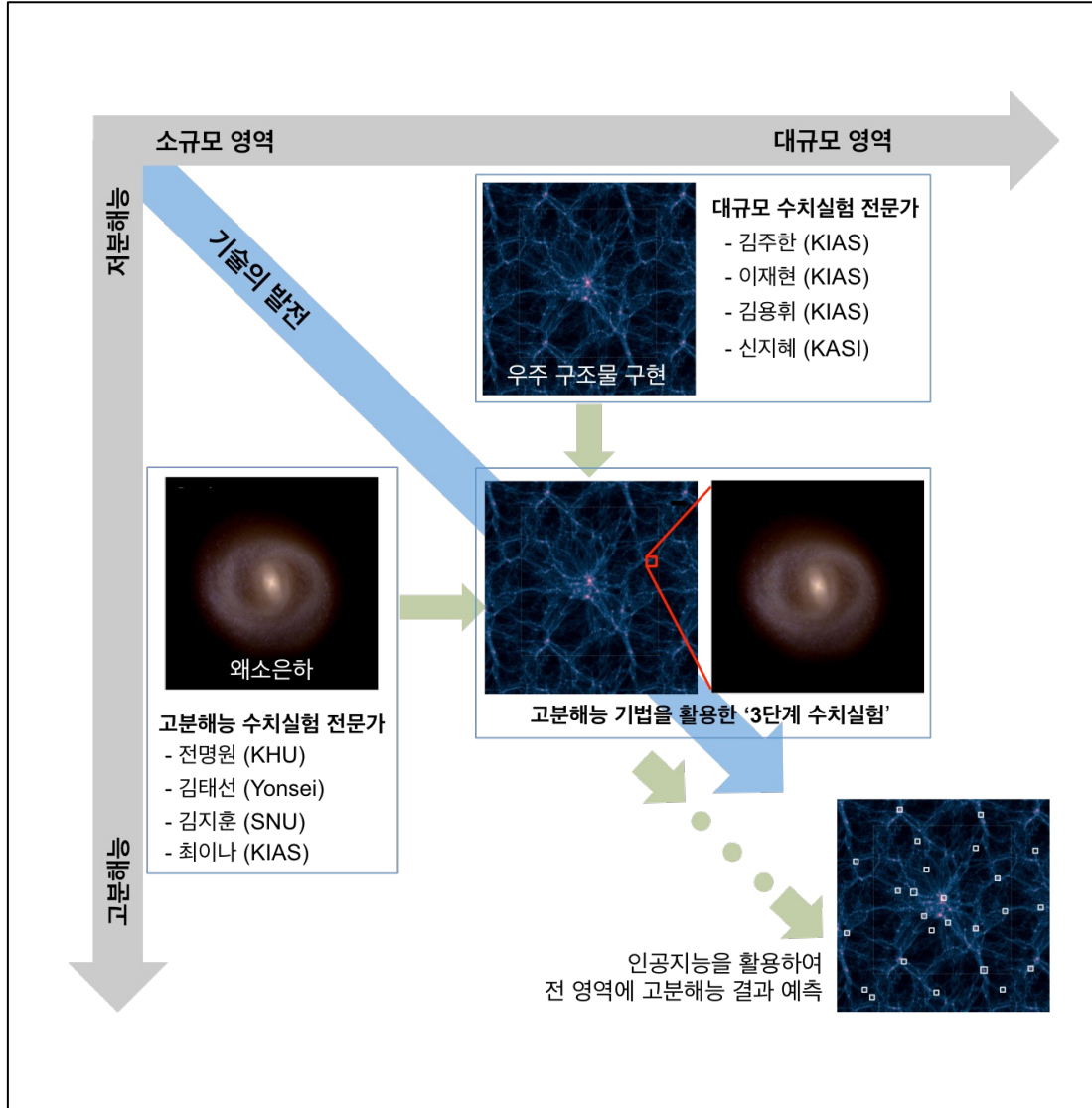
5차년도

왜소은하 정보 카탈로그화 & 아카이빙 시스템

왜소은하 형성기원 규명 연구

# 연구수행 역량

## 세계 최고 수준의 시뮬레이션을 수행하기 위해 필요한 전문성



| 번호 | 본 연구과제 과제에서 필요한 전문성   | 전문가                  |
|----|-----------------------|----------------------|
| 1  | 최적 병렬화 전문가            | 권오경                  |
| 2  | 유체역학 수치모형 개발, GPU 활용  | 김용휘                  |
| 3  | 바리온 물리(활동성은하핵)        | 김지훈, 최이나             |
| 3  | 바리온 물리(항성 피드백)        | 김태선                  |
| 3  | 바리온 물리(금속성 피드백)       | 전명원                  |
| 3  | 바리온 물리(복사냉각)          | 전명원, 김태선             |
| 4  | 여러 고분해능 수치모형의 특성      | 김지훈                  |
| 4  | 최대규모 중력진화 수치실험        | 김주한                  |
| 4  | 최대규모 유체역학 수치실험        | 이재현, 김용휘<br>김주한, 신지혜 |
| 5  | 초병렬 시뮬레이션 분석 툴 개발     | 김주한, 김용휘             |
| 6  | 인공지능으로 은하특성 예측        | 김지훈, 홍성욱<br>송현미      |
| 7  | 빅데이터 처리 및 분석          | 홍성욱                  |
| 8  | 은하 내 성간물질의 특성변화       | 김태선, 이재현             |
| 8  | 은하 내 성간물질의 유체역학적 변화   | 김용휘                  |
| 8  | 유체역학적 환경이 성간물질에 주는 영향 | 김태선, 이재현             |
| 8  | 왜소은하 특성 연구            | 김지훈, 김태선<br>전명원, 신지혜 |
| 8  | 우주거대구조와 은하 특성 연구      | 송현미, 이재현             |
| 8  | 은하를 활용한 우주론 연구        | 김주한, 홍성욱             |

감사합니다.

