

Computational Science and the Search for Dark Matter

Kihyeon CHO*

National Institute of Supercomputing and Networking,
Korea Institute of Science and Technology Information, Daejeon 34141, Korea

(Received 5 July 2016 : revised 14 July 2016 : accepted 14 July 2016)

While research in the 20th century is based on experiment or theory, that in the 21st century is based on computational science, a unification of experiment, theory, and simulation. Simulation has played a major role in the development of computing science. Even though the discovery of Higgs boson confirmed the validity of the standard model, the Universe still presents the mystery of dark matter, which is about five times more dominant than the standard-model particles. The cross section of dark matter is very small compared to that of standard-model particles, and the expected mass range of dark matter is very wide, ranging from μeV to PeV . Therefore, large amounts of experimental, observational, and simulation data are needed, as is computational science based on the unification of experiment, theory, and simulation. In this paper, we present methods and examples.

PACS numbers: 07.05.-t, 29.85.-c

Keyword: Dark matter, Computational science, Nuclear physics, Particle physics, Astronomical physics

계산과학과 암흑물질 탐색연구

조기현*

한국과학기술정보연구원 국가슈퍼컴퓨팅연구소, 대전 34141, 대한민국

(2016년 7월 5일 받음, 2016년 7월 14일 수정본 받음, 2016년 7월 14일 게재 확정)

20세기는 전통적인 실험, 이론 중심의 연구라면, 21세기는 실험-이론-시뮬레이션 융합 연구가 중심이다. 컴퓨팅의 급속한 발전으로 시뮬레이션의 역할이 중요하게 되었다. 힉스 입자 발견 후 표준모형이 정리 되었으나, 우주에 표준모형 입자의 약 다섯 배를 차지하고 있는 암흑물질은 질량만 있다는 사실 이외의 알려진 내용이 없다. 암흑물질의 산란단면적은 기존 표준모형 보다 훨씬 작으며, 예측 질량의 범위도 수 μeV 에서 수 PeV 의 영역으로 광범위하다. 그러므로 대용량의 실험, 관측, 시뮬레이션 데이터가 필요하며, 또한 질량의 영역범위가 너무 넓어 많은 매개 변수의 계산이 필요하다. 그러므로 암흑물질 연구에 실험-이론-시뮬레이션 융합 계산과학이 필요하며 그 방법론과 사례를 보여준다.

PACS numbers: 07.05.-t, 29.85.-c

Keywords: 암흑물질, 계산과학, 핵물리, 입자물리, 천체물리

*E-mail: cho@kisti.re.kr



I. 개요

계산과학이란 기존의 이론 또는 실험으로 접근하기 힘든 영역을 시뮬레이션을 이용하여 탐구할 수 있는 새로운 영역이다. 20세기 중반까지 인류는 이론과 실험 두 가지 방법에 의해 과학적 기술을 발전시켜 왔으나, 이후 괄목하게 발전되어 온 컴퓨터에 의하여 해결해 가고 있다 [1,2]. 컴퓨터가 진화됨에 따라 이제는 이론과 실험으로 해결할 수 없는 문제들까지 계산과학을 사용해 해결하는 것이 훨씬 더 경제적이며, 이러한 현상은 더 심화될 것이다. 우수한 컴퓨터와 대용량 데이터는 인간의 한계를 극복하게 한다 [3,4]. 계산과학은 복잡한 문제를 이해하고 해결하는 진화된 컴퓨팅 역량을 활용하며 급속하게 성장하는 학제적 분야이다 [5]. 계산과학은 자체적으로 새로운 연구 영역을 개척하고 다른 연구방법론에 강력한 장점을 제공하기도 한다. 이처럼 계산과학은 연구자와 전문가들이 복잡하고, 비용이 많이 들고, 위험하고, 대규모 그리고 초 미세현상에 대한 이론적 모델을 만드는 것을 가능케 한다 [5]. Table 1은 이론과 실험으로 해결 하기 어려운 도전적인 문제들에 대한 대체 방법으로 계산과학을 활용한 예이다 [5]. 우주 기원의 모델을 만들고 시뮬레이션을 할 수 있는 계산과학은 현재 우주에 실험으로 물리적 변화를 줄 수 없으므로 우주 진화를 관측할 수 있는 유일한 방법이다.

연구 환경의 변화와 데이터, 시설, 장비 및 계산 역량의 고도화로 계산과학의 비중이 높아져가고 있다. 즉, 진화하는 컴퓨팅과 대용량 실험데이터를 활용하여 데이터의 생성, 처리, 분석이 주요 연구 내용이 되는 연구가 주가 되고 있다. Table 2는 현재 능력보다 수백 배에서 수천 배의 계산능력을 필요로 하는 핵 입자물리 분야 계산과학을 소개하고 있다 [5].

Fig. 1은 실험-이론-시뮬레이션 융합 계산과학 연구를 보여준다 [1]. Table 3은 실험, 이론, 계산가능계 각각 가능성에 따른 시뮬레이션의 역할을 보여준다. 암흑물질 탐색은 직접탐색, 간접탐색, 가속기충돌 탐색에 따른 실험 가능영역과 암흑물질 기원에 따른 우주 진화의 시뮬레이션처럼 실험 불가능 영역 모두를 포함하고 있으며, 가속기 충돌실험과 은하계 생성 실험처럼 빅데이터를 포함하고 있다.

암흑물질 탐색연구에 계산과학은 경제적 효율성을 높여준다. 검출기 개발 등과 같은 경우 및 직접 샘플을 만들어야 하는 경우 많은 시간과 노력 비용이 소모되므로, 계산과학을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션으로 최적화 할 수 있는 영역을 알 수 있기 때문에 비용이 절감될 수 있다.

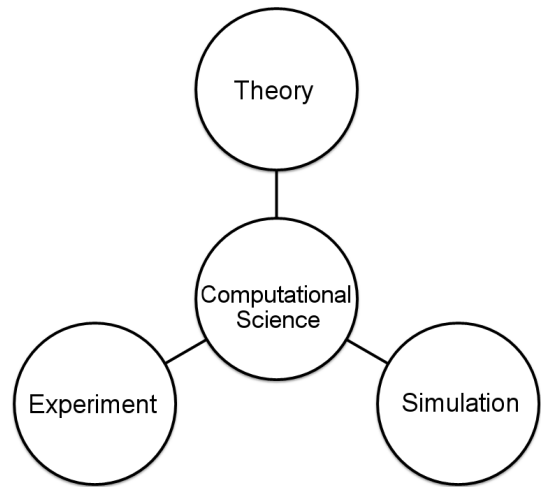


Fig. 1. The scheme of computational science on experiment-theory-simulation.

II. 암흑물질 탐색연구

입자물리 연구는 ‘표준모형을 포함한 더 큰 모델, 이론적으로 더 완성된 궁극의 모델이 있지 않을까?’ 라는 질문으로 진화되고 있다. 표준모형 너머 어떠한 물리가 있는지는 여전히 의문이며, 표준모형을 정밀 검증함으로써 새로운 물리를 찾는 노력을 하고 있다. 그 중의 한 후보인 암흑물질이 발견된다면 물리학적 의미가 높을 것이다.

암흑물질이란 우주에 널리 분포하는 물질로서, 전자기파 즉 빛과 상호작용하지 않으면서 질량을 가지는 물질이다. ‘물질의 근원은 무엇인가? 그 사이 상호작용은 무엇인가?’를 연구하는 입자물리학은 힉스입자 발견으로 표준모형이 정리가 되었다 [6,7]. 그러나 표준모형은 우주의 대부분을 구성하는 암흑물질과 암흑에너지는 제대로 설명하고 있지 못하다. 암흑물질은 망원경으로 그 모습이 보이지 않으나, 질량으로 천체 움직임에 영향을 미치므로 별이나 은하를 구성하는 중요한 존재이다.

태양과 지구의 거리, 지구의 공전 속도를 알면 지구를 태양계에 붙잡아두는 태양의 중력 크기를 계산해낼 수 있다. 은하단에서도 마찬가지다. 개개 은하의 위치와 공전 속도를 알면 그 은하단에 작용하는 중력 크기를 찾아낼 수 있다. 1933년 물리학자 프리츠 츠비키(F. Zwicky)는 ‘코마’라는 거대 은하단을 관측하던 중에 기이한 현상을 발견했다 [8]. 그는 은하단 중심 둘레를 공전하는 은하들의 속도가 너무 빨라, 눈에 보이는 코마 은하단 질량의 중력만으로는 이 은하들의 운동을 붙잡아둘 수 없다고 생각했다. 이런 속도라면 은하들은 튕겨나가고 은하단은 해체돼야 했다. 은하단의 중력질량인 역학질량이 은하단의 밝기에서 나오는 광도질량 보다 400배나 무거운 ‘보이지 않는 물질’인 암흑물질이 있을 것으로 가정하였다 [8].

Table 1. The examples of computational science [5].

Research Area	Computational science area	The reason of computational science use
Nano science	Carbon nano-tube, Structure of protein like surfing	Reduction of time
Bio&Medical Science	Human Genome research, The development of new medicine	Ethical issues of the experiment
Environment	Global climate, Contaminated material transfer	The risks of experiment
Physics	Spread of radioactive materials, A study of the origins of universe	The impossible or forbidden experiment
Nuclear Fusion	Nuclear fusion reactor simulation	An expensive cost

Table 2. The area of particle and nuclear physics based on computational science [5].

Area	Challenge projects	Results
Astro-nuclear physics	An evolution of star or supernova	Understanding of the conditions to the origins of heavy elements of the universe
High Energy Physics	A probe of the Standard Model and search for new physics	Understanding of the Standard Model and new physics
Accelerator Physics	Design of next generation accelerator using simulations	The efficient uses of current and future accelerators
Nuclear Physics	The description of quark-gluon plasma	Understanding of new state of nuclear physics

Table 3. Computational Science on experiment-theory-simulation.

Experiment	Theory	System	Simulation	Examples
Possible	Possible	Simple	- Conventional physics - The area where theory complements experiment	Conventional physics
Possible	Possible	Complex	- Large experimental data - The area where large storage and computing are needed	Collider experiment
Impossible	Possible	Simple	- Simulation based on theories - The theoretical interpretation-possible area which are not testable	Big bang, Black hole, Medical physics
Possible	Impossible	Complex	- Large calculation - The experiment-possible area where theoretical calculation is difficult	QCD, Electron structure
Impossible	Impossible	Complex	- Algorithm/Big Data - The area where it is unavailable neither in theory nor in experiment	Evolution of universe, Financial physics, Climate

1970년대 베라 루빈 (V. Rubin) 은 은하수의 가스회전 속도를 측정하였는데, 만유인력과 원심력이 같아야 함으로 속력은

$$v \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$$

로 중심에 가까울수록 회전속도가 빨라야 하나, 실제로는 은하 중심으로부터의 거리와 상관없이 모두 같은 속도로 움직이는 것을 발견하였다 [9]. 만약 그렇다면 이렇게 빠른 속도로 회전하는 은하수는 원심력 때문에 분해되어야 한다. 그러나 아직까지 은하수가 안정적인 형태를 유지하고 있다는 것은 은하수 총 질량이 눈에 보이는 것보다 10배 이상

커야 한다는 것을 의미한다 [9]. 이는 중심에서 멀리 있는 가스일 수록 자신의 안쪽에서 중력을 미치는 암흑물질의 총량이 많아져서 큰 중력이 작용하게 되어 결국은 가까이 있으나 멀리 있으나 회전속도는 거의 같아진다. 은하수 질량의 90%가 표준모형 물질이 아닌 ‘암흑물질’로 이루어져있다고 가정된다 [9].

지금까지 알려진 암흑물질의 필요조건은 어떠한 파장의 빛도 방출하지 않으며, 어떠한 물질과도 거의 부딪치지 않고 빠져나가며, 우주 초기에 거의 속도 0에 가까운 차가운 모델이다. 이러한 암흑물질 검출 방법에는 직접 검출, 간접 검출, 그리고 입자가속기에서 생성과 같이 세가지로

Table 4. The method to detect dark matter and domestic data storage.

Method	Before interaction	After interaction	Data	Storage Place
Direct detection	DM+SM	DM+SM	Direct detected data	IBS
Indirect detection	DM+DM	SM+SM	Astronomical data	KASI
Collider detection	SM+SM	DM+DM	Collider data	KISTI

Table 5. Computing resources for collider experiments at the GSDC, the KISTI.

Collider experiments	CPU	Storage	Size
ALICE	3,488	1500 TB (Hard Disk), 1500 TB (Tape)	Tier-1
CMS	992	400 TB	Tier-3
Belle / Belle II	312	100 TB	Tier-2

나눌 수 있다. Fig. 2는 표준모형 (standard model, SM) 물질과 암흑물질 (dark matter, DM) 사이의 상호작용으로 암흑물질을 검출하는 세가지 방법을 보여준다. 한국천문연구원 (Korea astronomy and space science institute, KASI)은 거대 스케일의 우주론에서 접근하고, 한국과학기술정보연구원 (Korea institute of science and technology information, KISTI)은 미시 세계인 입자물리에서 접근하여 상호 보완관계에서 우주의 비밀을 파악한다. 또한 기초과학연구원 (Institute for basic science, IBS)에서는 직접 검출 실험을 수행 중이다. 기술적인 중요성은 한국과학기술정보연구원 (KISTI)에서 개발한 데이터 핸들링 시스템을 천체관측 데이터에 활용하고, 대용량데이터센터 (Global science experimental data hub center, GSDC), 슈퍼컴퓨터를 활용해서 MC(Monte Carlo) 데이터 생산을 대규모 천체 데이터까지 확장을 한다. Table 4는 암흑물질 탐색연구 방법과 그에 따른 국내 데이터 저장장소를 보여준다.

한국과학기술정보연구원 대용량데이터센터에서는 ALICE, CMS, Belle/Belle II 데이터를 처리하기 위하여 Table 5의 시스템을 갖고 있으며, 고에너지물리 가속기 충돌 실험에서 생산되는 데이터를 대용량데이터센터 (GSDC)에서 처리하여 암흑물질을 탐색하고 있다.

또한, 현상론적 모델을 MadGraph [10] 등으로 도출하여 슈퍼컴퓨터의 활용을 제기하고 있으며, 한국천문연구원에서는 천체 관측 데이터를 활용해서 우주론에서 암흑물질을 탐색하고 있다. 계산과학 기반 입자물리학에서 출발한 암흑물질의 연구와 우주론에서 출발한 암흑물질의 연구가 서로 시너지 효과를 높일 수 있으며, 각 기관의 인프라를 활용하는 면에서 한국천문연구원에서는 우주론에서 제안된 모델

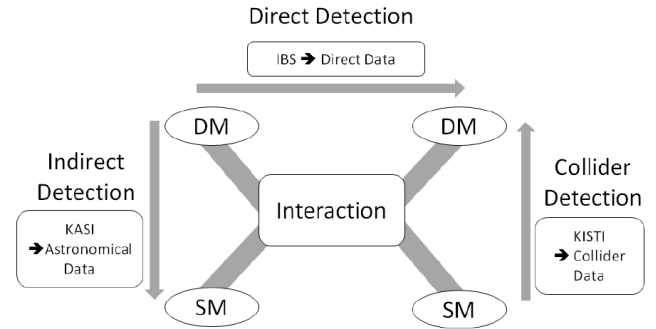


Fig. 2. The method to detect dark matter (Indirect detection, Direct detection and Collider detection).

연구를 위하여 한국과학기술정보연구원의 대용량데이터센터 및 슈퍼컴퓨터를 활용하고, 한국과학기술정보연구원에서는 한국천문연구원의 관측 데이터 자료를 대용량데이터센터에 두고 활용하여 실험과 비교할 수 있다. 계산과학을 활용한 국가 연구개발 효율화를 도모하기 위하여, ‘암흑물질 탐색연구 융합클러스터’¹를 구축하여 연구자들간 자원과 정보를 공유하여 연구의 시너지 효과를 높인다.

미국의 아르곤 국립연구소는 “Computation-driven discovery for the Dark University”라는 프로젝트를 통해서 암흑물질과 계산과학을 수행 중에 있다 [11]. 본 연구에는 네 가지 측면이 있다. 첫째, 현재와 미래 수요를 위한 차세대 계산 우주론의 예측과 분석 프레임 워크를 만들고 둘째, 대규모 구조 탐색을 통한 암흑에너지, 암흑물질, 중성미자와 초기 우주의 물리를 탐색하며 셋째, 3개의 고성능 시뮬레이션 코드 (HAAC, ART, and Nyx) 개발 향상과 넷째, 미국 에너지부의 계산과학 시스템의 리더십을 최대한 발휘하는 것이다 [11].

일본에서는 쓰쿠바대학교 그룹이 K computer를 이용해서 우주 진화와 관련된 암흑물질을 연구 중이다.

III. 계산과학기반 암흑물질 탐색연구

암흑물질에서 계산과학이 필요한 이유는 산란단면적이 작아서 신호 사건의 수가 적다는 것이다 [2]. 표준모형 중에서

¹ 2016년 6월 현재, 한국과학기술정보연구원, 한국천문연구원 등 15개 기관으로 이루어져 있음.

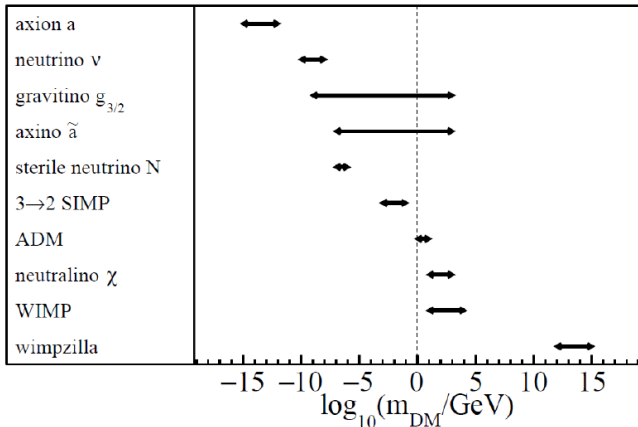


Fig. 3. The mass range of dark matter depending on models [12].

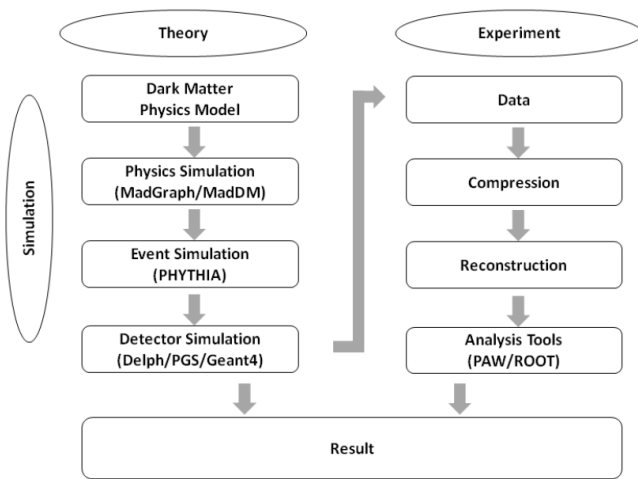


Fig. 4. The typical flowchart of experiment-theory-simulation on computational science.

가장 산란단면적이 작은 힉스입자의 발견으로 표준모형이 정리되었다. 그러나, 암흑물질의 산란단면적은 힉스입자의 1천분의 1 정도 보다도 작다. 따라서 힉스입자보다 최소한 천 배나 많은 실험 및 관측 데이터를 필요로 한다. 또한 배경사건 수 연구를 위해 그것보다 적어도 천 배나 많은 시뮬레이션 데이터를 필요하게 된다 [2]. 그리고, 질량영역과 결합상수 영역이 넓다 [12]. Fig. 3에서 현재 모델에 따른 질량 영역을 볼 수 있는데, 탐색해야 할 질량영역도 넓으므로 많은 양의 매개 변수를 요구한다.

Fig. 4는 전형적인 암흑물질 탐색 실험-이론-시뮬레이션 융합 계산과학 연구 흐름도이다. 암흑물질 탐색연구는 이론적 모델에서는 MadGraph [10]의 물리 시뮬레이션을 수행하고, 사건 시뮬레이션을 통하여, Geant4 [13]로 검출기 시뮬레이션을 한다.

Fig. 5에서 암흑물질 탐색연구의 물리적 요구에 의한 시뮬레이션 툴 킷 개발과 진화하는 컴퓨팅에 따른 시뮬레이션

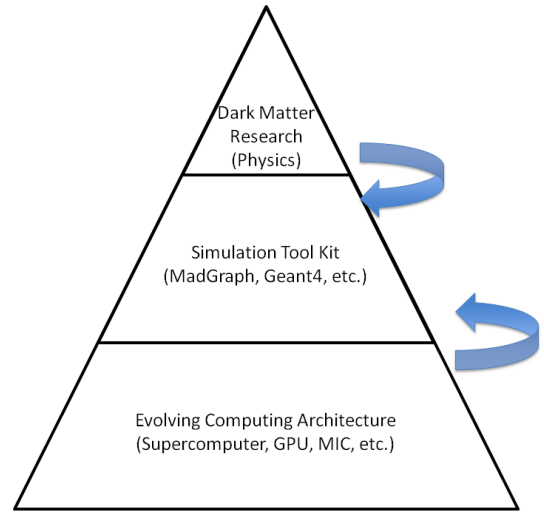


Fig. 5. (Color online) The scheme of requirement of simulation tool kit required by physics and evolving computing architecture.

툴 킷 개발의 개요를 볼 수 있다. 암흑물질 시뮬레이션에 관한 비전으로 암흑물질 연구 매니지먼트 시스템이 필요하다. 모델에 따른 데이터베이스와 매개 변수들을 계산하면, 이 시스템으로 실험의 결과들이 이론 매개 변수를 구속하게 되고 이론연구자는 실험의 예측 값의 정밀도를 높일 수 있다. 자동화된 툴이 있다면 빠르고 정확한 결과를 도출하여 연구자들이 편리하게 이용할 것이다.

암흑물질 탐색연구에 이론적 배경으로 많은 양의 시뮬레이션을 요구하고 있으므로 속도나 메모리 문제가 따르게 된다. 그러므로 이러한 연구에 시뮬레이션 툴 킷 개발이 필요하다. 또한, 컴퓨팅 자체도 CPU에서 GPU(graphics processing units), MIC(many integrated core) 등으로 진화하게 되는데, 소프트웨어가 그 성능을 따라 가고 있지 못하다. 그러므로 소프트웨어 개발은 진화하는 컴퓨팅의 요구 조건과 이론적 모델의 요구 조건을 모두 만족해야 한다. 이러한 연구는 어느 한 개인이나 연구기관이 할 수 없으며, 범 국가적으로 컨소시움을 이루어 개발할 필요가 있으며, 이에 고에너지물리 소프트웨어 컨소시움 (high energy physics software consortium, HSC)이 CERN을 중심으로 구성되어 운영 되고 있다 [14]. 현재 고에너지물리 연구는 많은 어려움에 직면해 있다. 그 이유는 유럽의 LHC(large hadron collider) 실험과 미국의 강도 프론티어 프로그램은 컴퓨팅 하드웨어의 진화를 필요로 하고 있기 때문이다. 또한 고에너지물리 연구에서는 소프트웨어 재공정이라고 부르는 기술적 진화를 필요로 하며, 기술은 더 정교한 소프트웨어 툴을 요구하고 있기 때문이다 [14]. 본 컨소시움의 목적은 고에너지물리 커뮤니티를 위하여 혁신적이고, 효율적이며, 지속 가능한 사용자용 소프트웨어 시스템을 만드는 것이다.

소프트웨어의 공통 문제를 풀고, 개인 프로젝트에서 협동의 수혜 영역을 찾으며, 공통 문제를 풀기 위한 경험과 자원을 풀로 만들어 공유하는 것이다. 고에너지물리 소프트웨어 (ROOT [15], Geant4 [13], GENIE [16], XrootD [17] 등) 로 시작하여 그 바깥으로 영역을 확장할 것이며, 풀뿌리 구조로서 연구자의 공통의 관심사와 자원을 공유하게 될 것이다 [14].

IV. 사례

현재 우주 공간이 균일하지 않아 은하가 밀집한 곳과 그렇지 않은 곳이 있다. 우주 탄생으로부터 현재에 이르기 까지, 은하가 생기기에는 표준모형 물질의 질량만으로 부족한 것이 아닌가라는 의문이 생겼다. 최근의 시뮬레이션 결과는 우주의 작은 구조인 별이나 은하를 만드는 중심적인 역할을 한 것은 암흑물질이라는 것을 보여준다.

이러한 시뮬레이션에 대규모 계산과학의 방법이 사용된다. 우주에서 암흑물질이 존재한다는 가정과 그렇지 않은 가정에서 우주의 대규모 구조의 진화 모습의 시뮬레이션을 비교해보면, 암흑물질이 존재한다고 가정한 시뮬레이션 결과에서는 시간이 지남에 따라 물질의 밀도가 크게 진화해서, 우주 탄생으로부터 현재 은하의 대규모 구조와 아주 비슷한 물질의 밀도가 나타났으나, 그렇지 않은 경우 현재 은하의 밀도가 보이지 않았다. 그러므로, 만약 암흑물질이 존재하지 않는다면 현재의 우주에 보이는 은하 구조는 나타나지 않을 것이라는 사실이 밝혀졌다.

2012년 썬바대학교 연구그룹은 K computer를 사용하여 암흑물질을 포함한 초기 우주 진화 계산을 하였다 [18]. 2 조개의 암흑물질 입자를 81,408 코어의 컴퓨팅(K computer의 98%)을 사용하여 5.67 PF(총 이론 성능의 55%)의 성능으로 연구하였다 [18]. 이 연구에서 TreePM method라는 알고리즘 활용하였는데, 짧은 거리에서는 tree 알고리즘을 먼 거리에서는 Particle mesh (PM) 알고리즘을 활용하는 것이다 [18]. 이 소프트웨어는 1조개 이상의 N-body 중력 시스템을 시뮬레이션 할 수 있다. 일반 개인 PC로 시뮬레이션 한다면 몇 백 년 걸릴 일을 약 3일 안에 완성할 수 있다 [19]. 이러한 시뮬레이션은 기존의 암흑물질 시뮬레이션 보다 은하계를 더 정밀하고 정확하게 시뮬레이션 한다.

또한 같은 해 미국 LLNL(Lawrence Livermore national laboratory) 연구그룹이 썬바대 연구와 비슷한 연구를 하였다. 이론적 성능 20 PF인 IBM Sequoia를 14 PF까지의 성능을 활용해서 LLNL에서 연구를 하였는데, 이 것은 K computer보다도 2배나 더 좋은 성능임에도 불구하고, 썬바대 연구그룹의 소프트웨어가 2.4배 더 빨리 N-body 중력 문제를 계산하였다 [19]. 이것은 소프트웨어의 발전이 얼마나 중요한 것인지 알려주는 좋은 예가 된다.

V. 맺음말

오늘날 계산과학은 전통적인 과학 영역을 넘어 암흑물질 탐색, 우주의 진화의 핵심 영역에 이르기까지 모든 분야에서 복잡한 문제를 해결하는데 필수적이다. 암흑물질 탐색 연구에 대규모 데이터와 전산자원을 필요로 한다. 또한, 진화하는 컴퓨팅에 따른 소프트웨어 개발과 암흑물질 탐색연구 물리학 자체가 요구하는 소프트웨어 개발이 필요하다. 이러한 것은 궁극적으로 어느 한 연구기관이 할 수 없으므로, 융합클러스터나 컨소시움을 이루어 각 연구기관들과 시너지 효과를 이루어야 한다. 궁극적으로 암흑물질 탐색연구에 실험-이론-시뮬레이션 융합 계산과학이 필요하며 이에 대한 사례를 보여 주었다.

감사의 글

본 연구는 국가과학기술연구회 암흑물질 탐색연구 융합 클러스터 사업 연구비 지원에 의해 이루어졌습니다.

REFERENCES

- [1] K. Cho, *J. Astron. Space Sci.* **33**, 63 (2016).
- [2] K. Cho, J. Kim and J. H. Kim, *J. Phys. Con. Ser.* **664**, 072001 (2015).
- [3] S. C. Lin and E. Yen, *J. Korean Phys. Soc.* **55**, 2035 (2009).
- [4] K. Cho, J. Kim and S.-h. Nam, *Comput. Phys. Commun.* **182**, 1756 (2011).
- [5] Presidential Advisory Council on Science and Technology, *A study on fostering for computational science and technology* (Seoul National University, 2004).
- [6] CMS collaboration, *Phys. Lett. B* **716**, 30 (2012).
- [7] ATLAS collaboration, *Phys. Lett. B* **716**, 1 (2012).
- [8] F. Zwicky, *Helvetica Physica Acta* **6**, 110 (1933).
- [9] V.C. Rubin, W. K. Ford Jr., *Astrophys. J.* **159**, 379 (1970).
- [10] J Alwall *et al.*, Preprint arXiv:1405.0301 [hep-ph].
- [11] Mathematics and Computer Science homepage, <http://www.mcs.anl.gov/project/computation-driven-discovery-dark-universe> (accessed Jun. 30, 2016).
- [12] H. Baer, K.-Y. Choi, J. E. Kim and L. Roszkowski, *Phys. Rep.* **555**, 1 (2015).

- [13] S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis and H. Araujo *et al.*, [Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A](#) **506**, 250 (2003).
- [14] L. Bauerdick, P. Calafura, P. Elmer, L. Sexton-Kennedy and P. Spentzouris *et al.*, HEP Software Consortium, 2014.
- [15] ROOT homepage, <https://root.cern.ch> (accessed Jun. 30, 2016).
- [16] GENIE homepage, <http://www.genie-mc.org> (accessed Jun. 30, 2016).
- [17] XrootD homepage, <http://xrootd.org> (accessed Jun. 30, 2016).
- [18] T. Ishiyama, K. Nitadori and J. Makino, in *Proceedings of the International Conference on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC' 12)* (IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, USA, 2012), Article 5.
- [19] Center for computational science homepage, <http://www.ccs.tsukuba.ac.jp/eng/public-relations/media/gbp2012/> (accessed Jun. 30, 2016).