

머리말

이 지구상에 살다가 먼저 떠난 선조들은 약 천억 명으로 추산된다. 그렇다면 그들이 이곳에 살았을 적에 가장 풀기 어려웠던 숙제는 과연 무엇이었을까? 아마도 추위나 배고픔보다 더 극복할 수 없었던 것은 태어나서 병들고 늙어서 죽는 일이 아니었을까? 우리는 태어나서(生) 목숨(命)이 다하는 존재를 생명체라고 부른다. 그러나 우리는 불행히도 생명이 무엇인지를 잘 모른다. 필자에게 가장 난감한 일 중 하나가 다짜고짜로 물어 오는 ‘생명이란 무엇인가?’라는 질문이다. 뇌 수술만을 업으로 삼고 살아온 필자에게 가장 정곡을 찌르는 질문처럼 들리기도 한다. 특히나 생명의 종료를 선언해야 하는 의사들에게는 이 질문에 대한 준비는 꼭 필요하다. 그렇지만 현실은 결코 만만치 않다. 왜냐하면 생명을 속속들이 알기 위해서는 너무나 방대한 지식과 자료가 요구된다는 것을 잘 알고 있기 때문이다. 과연 생명이란 무엇일까? 우리는 그 해답을 얻을 수 있을까? 이 해답을 찾아 떠나는 길이 책 속에서 그려질 것이다.

인간을 포함하여 거의 모든 생명체를 구성하고 있는 재료들은 의외로 단순하다. 수소, 탄소, 질소, 산소, 인, 황이 98%를 차지한다. 그렇다면 이 생명의 재료는 도대체 어디에서 만들어졌을까?

제1장은 이 질문에 대한 대답으로 채워져 있다. 그래서 우리는 수소와 헬륨이 만들어지는 빅뱅을 논할 것이며, 별들의 탄생과 죽음을 다룰 것이다. 현재의 생물권을 형성하고 있는 모든 생명체의 공통 조상, 즉 루카(last universal common ancestor; LUCA)가 이 지구상에 등장한 것은 약 38억 년 전으로 추정된다. 이들이 현재까지 도달하는 기나긴 생명의 역사가 제2장에 그려질 것이다. 그리고 제3장에서는 이러한 최초의 생명체가 어떻게 탄생하였는지를 추정해 볼 것이다.

인간은 계통수의 끝 가지에 매달려 있는 생명체의 한 종에 불과하다. 따라서 인간의 삶과 죽음을 이해하기 위해서는 계통수를 구성하는 전 생명체의 운명을 전반적으로 살펴보아야만 한다. 제4장은 모든 생명체를 분류하고, 이들을 세균계, 고세균계, 원생생물계, 식물계, 균계 및 동물계의 6계로 구분하였다. 또한 이들이 각기 어떻게 생겼고(제5장), 어떻게 성장하며(제6장), 어떻게 먹고 사는지(제7장)를 알아볼 것이다.

그뿐만 아니라 죽을 운명을 가지고 태어난 생명체가 이를 극복할 방법의 하나인 번식(제8장)은 세균에서부터 인간에 이르기까지 다양한 방법으로 행하여진다는 것을 알게 될 것이다. 그리고 번식을 통하여 일어나는 유전 현상은 핵산의 기본구조와 함께 제9장에서 다루어질 것이다. 또한 맨눈으로는 보이지도 않는 작은 세균에 불과했던 최초의 생명체가 어떻게 190톤이 넘는 대왕고래나 100m가 넘는 미국 삼나무로 전개되어 나갔는지를 제10장 ‘생명의 진화’ 편에서 자세히 다룰 것이다.

모든 생명체는 늙고 병든다. 그렇다면 왜 이런 현상이 보편적으로 일어나야만 할까? 그리고 우리에게 이를 극복할 수 있는 가능성은 남아 있을까? 우리가 현재 알고 있는 대답들이 제11장 ‘생명의 노화’ 편에서 다루어질 것이다. 드디어 우리는 생명의 끝자락으로 내몰리게 된다. 제12장은 생명이 소멸되어 사라지는 과정을 그릴 것이다. 모든 생명체는 단세포에서 출발하여 다세포인 고등생물로 진화해 왔지만, 다세포 생물은 한 개의 배우자(配偶子, gamete)만을 남기고 모두 다 사라지는 운명에 처한다. 이들은 다시 다세포에서 단세포인 수정란으로 되돌아가서 새로운 생명을 이어 갈 것이다.

머리말

마지막으로 제13장 ‘생명의 미래’ 편에서는 생물권에 가해지는 위험요소들을 다룰 것이다. 먼저 유전공학과 줄기세포 이용의 위험성을 경고할 것이며, 인공지능과 핵무기 및 기후변화에 의한 생물권의 위태로운 상황을 예측해 볼 것이다. 마지막으로 언젠가 우리에게 나타날 수도 있는 외계 생명체에 대한 가능성을 점쳐 볼 것이다.

지난 3년간 ‘생명의 이해’라는 강좌를 개설하여 교양과목으로 만났던 학생들의 얼굴이 떠오른다. 그들은 모두 의과대학이나 간호대학 및 의과학 대학생들로 장차 의료인이 될 재목들이었다. 그들에게 강의를 진행하면서 약속했던 교재를 뒤늦게 완성하게 되어서 송구한 마음이다. 부디 이 책이 학생들뿐 아니라 ‘생명이란 무엇인가?’ 혹은 ‘삶과 죽음이란 무엇인가?’ 등의 근본적인 질문에 묵말라하는 일반인에게도 도움이 되길 기대한다. 그리고 산책길에서 만나는 풀 한 포기에도 생명의 의미를 되새겨 볼 수 있는 즐거움이 솟아나길 고대해 본다.

이 책의 표지는 가장 핵심적인 ‘생명이란 무엇인가’라는 물음을 던지는 것으로 묘사하였다. 먼저 우리 은하에 자리잡고 있는 이 지구에서만 출발한 생명은 그 뿌리를 우주의 원소에 두고 있음을 우리는 잘 알고 있다. 따라서 원소와 분자, 그리고 유전자의 출현을 알리고, 그 뒤를 이어서 바이러스, 박테리아, 원생생물 순으로 물음표를 타고 인간까지 올라갈 것이다. 또한 이 책에서는 가급적이면 처음 등장하는 용어는 볼드체를 사용하여 눈에 잘 띄도록 하였고, 한문과 영어를 넣어서 이해력을 높이도록 노력하였다. 그리고 인명 뒤에는 출생 및 사망 연도를 넣어서 혼돈을 미리 막아 두었다. 이와 더불어 한글과 영문 색인(index)을 필자가 직접 뽑아냄으로써 보다 더 쉽게 책 내용을 찾아볼 수 있도록 하였다.

이 책은 천문학, 지리학, 물리학, 철학, 기상학, 분류학에서부터 고생물학, 종교학, 식물학, 분자생물학, 컴퓨터 공학까지 수많은 전공 분야들이 관여되어야 집필 가능한 소재들로 이루어져 있다. 따라서 학문의 경계를 넘어갈 수밖에 없는 태생적 한계를 가지고 있다. 그리하여 필자의 천학(淺學)과 비재(非才)로 인하여 타 학문에 대한 기술이 부실할 수 있다는 점을 밝혀 두고 싶다.

아인슈타인은 “당신이 만약 무언가를 쉽게 설명할 수 없다면, 그것을 이해하고 있다고 말할 수 없다”는 명언을 남기고 있다. 이 책의 각 장은 한 권의 책으로 꾸밀 수 있는 주제들이다. 만약 필자에게 힘이 남아 있다면, 다시 더 쉬운 책으로 독자들에게 다가갈 기회를 가질 것이다.

끝으로 이 책의 출판에 도움을 주신 분들에 대한 감사를 표하고 싶다. 먼저 New Mexico 대학 생물학 교실의 Christopher Witt 교수에게 감사를 드린다. 그는 꽃과 벌새의 공진화를 알려 주는 멋진 사진을 게재할 수 있게 허락해 주었다. 그리고 California Institute of Technology 문서보관소의 Loma Karklins에게도 감사를 드린다. 그녀가 1931년 월슨산 천문대에서 아인슈타인과 허블이 만나는 장면을 담은 오래된 사진을 원본과 함께 제공해 준 덕분에 제1장을 수월하게 출발할 수 있었다. 또한 이 책의 출판을 결정해 주신 대한나래출판사의 최용원 사장님, 그림 작업에 힘써 주신 박동진 차장님과 김도하 선생님, 까다로운 표지 그림 수정을 잘 참아내 준 장순임 차장님, 그리고 끝까지 교정에 매달려 주신 윤수현 과장님께 감사의 말씀을 드린다. 마지막으로 그들의 세포를 아낌없이 내게 전해 준 돌아가신 아버님과 어머님, 이제 나의 세포를 다시 다음 세대로 함께 전해 준 최정연 원장, 그리고 하정, 하진, 한지윤과 7월에 만나게 될 손녀에게도 감사와 고마운 마음을 전한다.

2021년 4월 매봉산 밑에서
저자 하영일

목차

제1장 모든 것의 시작 1

제1절 우주의 탄생	2
제2절 우주의 역사	7
1. 우주의 기본 힘	7
2. 표준모형	8
3. 우주의 시작	8
제3절 별의 탄생	11
1. 별의 역사	11
2. 별들의 일생	12
제4절 물질의 탄생	15
1. 물질의 역사	15
2. 물질의 출현	17
제5절 생명의 재료	18
1. 주기율표	18
2. 생명의 원소	21
제6절 생명의 정의	23
1. 생명이란 무엇인가?	23
2. 생명의 특징	24

제2장 생명의 역사 29

제1절 지구의 역사	30
1. 운석 충돌구	31
2. 원시 태양계와 지구	33
3. 연대측정법과 지구의 나이	34
4. 지질 연대표	36
제2절 지구의 환경변화	40
1. 대기와 기온의 변화	40
2. 빙하기와 해수면 변화	42
3. 산소의 출현	45
4. 대멸종	47
제3절 대륙과 대양의 변화	48
1. 대륙이동설	48
2. 판구조론	51

목차

제4절 생명 연대표	54
1. 화석	55
2. 생명의 출현	55

제3장 생명의 탄생 63

제1절 생명의 기원	64
1. 초자연설	64
2. 자연발생설	65
3. 생물속생설	65
4. 우주 기원설	68
제2절 화학적 진화	68
1. 분자 탄생	68
2. 거대생물분자 탄생	69
3. 최초의 세포 탄생	72
제3절 생물학적 진화	77
1. 내부공생설	77
2. 다세포 생명체 탄생	80
제4절 생명의 탄생 과정	81

제4장 생명의 분류 85

제1절 종이란 무엇인가?	86
1. 종의 정의	86
2. 종의 수	88
3. 분자시계	89
4. 바이러스	89
제2절 생명의 분류	90
1. 이명법	90
2. 3역 6계	92
3. 계통수	92
제3절 세균계의 분류	95
제4절 고세균계의 분류	96

목차

제5절 원생생물계의 분류	98
1. 원생동물	99
2. 원생식물	100
3. 균류성 원생생물	102
제6절 식물계의 분류	103
1. 선태식물	104
2. 양치식물	105
3. 겉씨식물	105
4. 속씨식물	106
제7절 균류계의 분류	107
1. 접합균류	108
2. 자낭균류	108
3. 담자균류	108
제8절 동물계의 분류	109
1. 동물계의 공통조상	109
2. 분류기준	109
3. 동물계의 분류	113

제5장 생명의 구조 121

제1절 모든 것의 크기	122
1. 미시세계	122
2. 거시세계	123
3. 세포가 작아야 하는 이유	124
제2절 원핵세포의 구조	126
1. 원핵세포의 기본구조	126
2. 세균의 구조	127
3. 고세균의 구조	134
제3절 진핵세포의 구조	137
1. 진핵세포의 기본구조	137
2. 원생생물의 구조	146
3. 식물의 구조	147
4. 균류의 구조	150
5. 동물의 구조	151
제4절 3역 6계의 구조적 차이점	152
1. 원핵세포와 진핵세포의 차이점	152

목차

2. 3영역의 구조적 차이점	152
3. 6계의 구조적 차이점	152
4. 식물세포와 동물세포의 차이점	152

제6장 생명의 성장 159

제1절 세포분열 총론	160
1. 일반론	160
2. 세포주기	161
제2절 각 영역별 세포분열	163
1. 세균 및 고세균	163
2. 원생생물	164
3. 균류	166
4. 식물	167
5. 동물	168
6. 동물과 식물의 세포분열 차이점	169
제3절 발생과 성장	170
1. 일반론	170
2. 균류	172
3. 식물	174
4. 동물	184
5. 동물과 식물의 발생 및 성장의 차이점	192

제7장 생명의 대사 197

제1절 서론	198
제2절 거대분자 구조	199
1. 축합 및 가수분해반응	199
2. 탄수화물	200
3. 단백질	201
4. 지질	203
제3절 광합성	205
1. 엽육세포 및 엽록체 구조	205
2. 명반응	208
3. 암반응	214

목차

제4절 세포호흡	216
1. 해당과정	216
2. 크렙스 회로	219
3. 전자전달계 및 산화적 인산화	220
제5절 광합성과 세포호흡의 차이	224
제6절 생물의 영양방식	226
1. 광독립 영양생물	227
2. 광종속 영양생물	228
3. 화학독립 영양생물	229
4. 화학종속 영양생물	229
제7절 대사적 진화	230
1. 38억 년 전후	230
2. 식물의 변신	234

제8장 생명의 번식 241

제1절 번식이란 무엇인가?	242
1. 번식	242
2. 체세포와 생식세포	242
3. 체세포분열과 감수분열	243
4. 암컷과 수컷	245
5. 정자가 난자를 만나는 방법	248
6. 수정	248
제2절 번식의 종류	250
1. 무성생식	250
2. 유성생식	256
제3절 원핵생물의 번식	259
1. 무성생식	259
2. 박테리아 섹스	261
제4절 원생생물의 번식	265
1. 번식 방법	265
2. 원생동물의 번식	266
3. 식물성 원생생물의 번식	270
4. 균류성 원생생물의 번식	274

목차

제5절 균류의 번식	274
1. 번식 방법	274
2. 접합균류의 번식	277
3. 자낭균류의 번식	278
4. 담자균류의 번식	279
제6절 식물의 번식	281
1. 번식 방법	281
2. 선태식물의 번식	283
3. 양치식물의 번식	283
4. 나자식물의 번식	284
5. 피자식물의 번식	287
제7절 동물의 번식	291
1. 무성생식	292
2. 유성생식	292
3. 생활주기	294
제8절 번식 방법의 장단점	295
제9절 성의 기원과 진화	296
1. 성의 기원	296
2. 성의 진화	298

제9장

생명의 유전

305

제1절 유전학의 역사	306
1. 고대 유전 이론	306
2. 멘델의 등장	307
3. 현대 유전학의 출현	310
제2절 핵산 구조	312
1. 기본구조	312
2. DNA	315
3. RNA	316
제3절 염색체	317
제4절 중심원리	322
1. 복제	322
2. 단백질 합성	328

목차

제5절 돌연변이	332
1. 원인	332
2. 종류	333
3. 결과	338

제10장 생명의 진화 347

제 1 절 서문	348
제 2 절 최초의 공통 선조	349
제 3 절 진화의 증거	350
1. 고생물학적(화석) 증거	351
2. 해부학적 증거	353
3. 발생학적 증거	356
4. 생화학적 증거	357
5. 분류학상의 증거	359
6. 생물지리학적 증거	359
제 4 절 진화의 기전	360
1. 자연선택	360
2. 돌연변이	362
3. 유전적 부동	362
4. 유전자 이동	364
5. 작위적 교배	364
제 5 절 진화의 유형	365
1. 발산진화	365
2. 수렴진화	365
3. 평행진화	366
4. 공진화	366
5. 협동진화	367
6. 이시성 진화	367
7. 종 분화	369
8. 멸종	370
제 6 절 원핵생물의 진화	370
1. 원핵생물 우선설	371
2. 진핵생물 우선설	372
3. 핵구획 공통설	372
4. 고세균 우선설	372

목차

제 7 절 원생생물의 진화	372
1. 내부공생	373
2. 다세포 진화	376
제 8 절 균류의 진화	377
제 9 절 식물의 진화	381
1. 육상식물의 기원	381
2. 육상식물의 적응	382
3. 식물 기관의 진화	384
4. 식물문의 진화	389
제10절 동물의 진화	391
1. 동물의 기원	391
2. 무척추동물의 진화	393
3. 척추동물의 진화	396
4. 인간의 진화	427
5. 홀스 유전자	439

제11장	생명의 노화	453
-------------	---------------	------------

제1절 서문	454
제2절 노화 역학	455
제3절 노화의 정의	457
제4절 노화의 유형	458
1. 정상 노화	458
2. 성공 노화	458
3. 병적 노화	459
4. 조로증	459
제5절 노화의 기전	460
1. 예정설	460
2. 과오설	461
3. 진화설	464
4. 노화의 원인 및 특징	468
제6절 노화의 치료 및 예방	481
1. 노화의 치료	482
2. 노화의 예방	483
3. 치료 전망	485

목차

제12장	생명의 소멸	491
제1절 서론	492	
1. 단세포 생명체 소멸	492	
2. 다세포 생명체 소멸	493	
3. 인간의 소멸	495	
제2절 죽음의 정의	498	
1. 죽음의 형태	498	
2. 뇌사	499	
제3절 죽음에 대한 생물학적 견해	500	
1. 죽음에 대한 방어기전	501	
2. 헬라세포	504	
3. 죽음의 생리학적 극복	505	
제4절 죽음에 대한 진화적 견해	508	
1. 죽음의 탄생	508	
2. 죽음의 진화	509	
3. 죽음의 진화적 극복	512	
제5절 죽음에 대한 물리학적 견해	513	
1. 열역학 법칙	513	
2. 네겐트로피	515	
3. 죽음의 물리학적 극복	516	
제6절 죽음에 대한 철학적 견해	516	
1. 영혼의 존재	516	
2. 일원론과 이원론	519	
3. 철학과 죽음	521	
제7절 죽음에 대한 종교적 견해	527	
1. 무교	528	
2. 유교	529	
3. 불교	529	
4. 그리스도교	532	
5. 사후생과 임사체험	534	
6. 종교와 과학	536	
제8절 안락사	537	
1. 개요	537	
2. 유형 및 논쟁	538	
3. 역사 및 현황	539	

목차

제13장	생명의 미래	545
제1절 서론	546	
1. 지구의 역사와 대멸종	546	
2. 생명체에 대한 위험요소	548	
제2절 유전공학	549	
1. 유전공학의 역사	550	
2. 유전자 재조합 기술	552	
3. 유전공학의 미래	556	
제3절 줄기세포 및 생물 복제	563	
1. 개요 및 역사	563	
2. 줄기세포	566	
3. 생물 복제	570	
4. 생명의 창조	574	
제4절 인공지능 및 뇌-컴퓨터 인터페이스	575	
1. 인공지능	575	
2. 뇌-컴퓨터 인터페이스	586	
제5절 생물과 핵무기	589	
1. 핵무기 원리	590	
2. 핵무기 개발	592	
3. 핵무기 위험성	598	
제6절 생물과 기후변화	600	
1. 기후변화의 역사	600	
2. 기후변화의 원인	603	
3. 기후변화의 영향	611	
4. 전망 및 대응방안	614	
제7절 외계 생명체	616	
1. 우주생물학	616	
2. 탐구 역사	618	
3. 거주가능 영역	620	
4. 페르미 역설과 전망	624	
찾아보기	631	

C h a p t e r

01

모든 것의 시작



제1절 우주의 탄생
제2절 우주의 역사

제3절 별의 탄생
제4절 물질의 탄생

제5절 생명의 재료
제6절 생명의 정의

제 1 절

우주의 탄생

정월 대보름날 동네 꼬마들이 나락을 베어 낸 논바다에다 불 집을 만든다. 안에다 짚단을 넣고 밖으로 청솔가지를 둘러서 인디언 텐트처럼 생긴 불놀이 집을 만든 것이다. 곧 보름달이 야산 위로 얼굴을 내밀 것이다. 이 꼬마들 중 제일 먼저 보름달을 본 사람이 짚단에다 불을 붙이고, 활활 타오르는 청솔가지 연기로 보름달을 그을릴 것이다. 시꺼먼 연기가 별이 쏟아지는 밤하늘로 피어오른다. 아이들은 더 신이 나서 이번에는 논두렁에다 불을 붙이며 들판을 돌아다닌다. 밤하늘로 두둥실 솟아오른 보름달은 연기에 그을려 군데군데 검은 솟검뎡이 반점들이 묻어 있다. 꼬마들은 청솔가지의 위력을 실감이나 한 듯 서로의 얼굴을 쳐다보며 즐거워한다. 그러나 누구 하나도 실제 달까지의 거리가 얼마인지 의문스럽게 생각한 꼬마들은 없어 보였다. 이런 풍경은 우리가 만들어 낸 어린 시절의 동화 속 그림들이다.

실제 지구에서 달까지 평균 거리는 얼마나 될까? 만약 강의용 레이저 포인트로 달을 가리킨다면, 레이저가 달까지 도달하는 데는 시간이 얼마나 걸릴까? 이런 질문을 던지기 시작한 것은 청솔가지를 태우기 시작하고 약 40년이나 지난 후의 일이다.

레이저 빔이 달에 도달하는 시간은 약 1초(더 정확히는 1.33초) 정도 걸린다. 그렇다면 레이저를 태양에다 쏘다면 레이저가 태양에 도달하는 시간은 얼마나 걸릴까? 약 8분 정도 소요된다. 이는 우리가 지금 이 빛을 이용하여 물체를 보고 있지만, 그 빛은 실제 8분 전에 태양에서 출발한 빛이란 뜻이다. 빛은 1초에 약 30만 km를 달린다. 30만 km라니? 서울에서 미국 LA까지 거리는 약 만 km 정도 된다. 그러나 비행기를 타고 만 km를 지겨워하지 않고 태평양을 건너는 승객이 몇 사람이나 될까? 빛은 비행기로 10시간 이상 가야 할 거리를 0.03초 만에 가 버린다.

빛이 달리는 시간과 거리를 광초(光秒, light second), 광분, 광시, 광년으로 표시한다. 우주에서 기본으로 사용되는 거리 개념은 광년(光年, light year)으로, 빛의 속도로 1년간을 달려야 도달할 수 있는 거리를 의미한다. 예를 들면, 태양계에서 가장 가까운 별은 **프로xima 센타우리**(Proxima centauri)

이다. 지구에서 이 별까지 가는 데 걸리는 시간은 약 4광년이 다. 빛의 속도로 4년을 가야 한다는 계산이다. 우리와 가까운 은하 중의 하나인 **안드로메다 은하**(Andromeda galaxy)는 약 250만 광년이 소요된다. 안드로메다 은하는 육안으로도 볼 수 있다. 만약 오늘밤 안드로메다 은하에서 온 별빛을 당신이 보았다면, 그 빛은 약 250만 년 전에 안드로메다 은하에서 출발한 빛일 것이다³⁶. 그 당시 지구에는 인간이란 찾아볼 수도 없었고 단지 원숭이들만 우글거리며 살고 있었을 것이다. 이번에는 2012년 허블우주망원을 이용한 **더 익스트림 딥 필드**(the extreme deep field; XDF, 후에 자세히 설명함) 프로젝트에서 찾아낸 132억 년 전의 은하는 어떤 의미일까? 허블망원경이 찾아낸 그 빛이 지구를 향해 출발했을 때는 지구도 태양도 이 우주에 없던 시절이었다는 것을 뜻한다¹⁹. 과연 인류는 우주라는 하늘에 대하여 무엇을 생각하고 있었을까? 이 과정을 함축적으로 추적해 보기로 하자.

2세기경 폴란드 천문학자 **클라우디오스 프톨레마이오스**(Claudius Ptolemaeus, 83~168경)는 고대 그리스부터 이어져 오던 천동설, 즉 지구 중심설을 보다 더 체계화시킨다. 태양계의 중심은 지구라는 뜻이다. 이는 바로 로마 가톨릭교회의 지지를 받아 사회적으로 공인된 천문학적 지식이 된다. 이러한 **천동설**(天動說, geocentrism)이 태양 중심설인 **지동설**(地動說, heliocentrism)로 바뀌기까지는 약 1,500년이 걸려야 했다. 결국 천문학의 발전은 중세 암흑기 동안 제자리걸음을 하고 있었던 셈이다.

천동설에 반기를 들고 나선 첫 번째 인물은 바로 폴란드 천문학자인 **니콜라우스 코페르니쿠스**(Nicolaus Copernicus, 1473~1543)이다. 그는 1543년 “천구의 회전에 관하여”라는 서적을 출판하여 중세의 우주관을 뿌리째 뒤흔들게 된다. 지구가 중심이 아니라 태양이 중심이라는 주장이다. 그는 이 책을 출판한 바로 그해에 뇌출혈로 사망하였다. 그가 종교로부터 박해를 받지 않은 이유는 출판 후에 더이상 오래 살지 못한 것이 중요 원인이 되었을 것이다. 그러나 후세의 **조르다노 브루노**(Giordano Bruno, 1548~1600)는 가톨릭교회의 우주관과 맞지 않는다는 이유로 화형을 당하였고, 다른 이탈리아 사람인 **갈릴레오 갈릴레이**(Galileo Galilei, 1564~1642)는 지동설을 주장하다가 가택 연금을 당하여 말년을 비참하게 마감

하게 된다. 결국 논쟁의 중심에는 태양계 정도가 핵심이었던 시절이었다.

우주의 기원에 대한 논의에 물꼬를 튼 사람으로는 아무래도 **에드윈 허블**(Edwin Hubble, 1889~1953)을 먼저 소개해야 할 것 같다. 허블은 태양계가 속해 있는 **우리 은하**(Milky Way Galaxy)가 우주 전체라고 생각하던 시절에 우리 은하 밖에도 다른 은하들이 많이 있다는 것을 처음으로 알아챈 과학자이다²⁹. 허블이 별들에 대한 궁금증을 키웠던 것은 그가 어릴 적 미주리주에 살 때, 할아버지의 영향을 많이 받은 것으로 전해진다. 할아버지는 그를 데리고 한적한 길을 걸으면서 밤하늘에 쏟아지는 별들에 대한 호기심을 자극했을지도 모른다. 그는 만능 운동선수였고 시카고대학에 진학하여 아버지의 뜻에 따라 법학을 전공하였다. 그렇지만 결국 그가 받은 박사 학위는 천문학이었다. 그가 대학원생으로 천문학을 연구하던 천문대는 시카고 북쪽에 있는 레이크 제네바(Lake Geneva) 호수의 윌리엄스 베이(Williams Bay)에 있는 여키스 천문대(Yerkes Observatory)였다. 누구나 시카고 지역을 여행할 사람이라면 한 번쯤 찾아볼 만한 멋진 장소이기도 하다. 허블은 1차 세계대전에 참전한 후, 1919년 미국 LA의 패서디나(Pasadena)시를 북쪽에서 둘러싸고 있는 윌슨산 천문대(Mount Wilson Observatory)에서 근무를 시작하게 된다.

허블이 이룩한 업적 중에서 가장 괄목할 만한 것 중 하나가 바로 1929년 발표한 **우주팽창설**(宇宙膨脹說, cosmic expansion theory)이다. 우주가 팽창한다는 것은 우주가 마치 고무풍선처럼 계속 부풀어진다는 의미이다. 이는 지금까지 인류가 생각해 왔던 우주와는 완전히 동떨어진 주장인 것이다. 인류가 생각해 왔던 우주는 팽창하는 것이 아니라, 항상 변하지 않으며 시작도 끝도 없는 시공간으로 생각돼 왔다. 이러한 **정상 우주론**(定常宇宙論, steady state theory)은 당대의 최고 과학자인 **알베르트 아인슈타인**(Albert Einstein, 1879~1955)의 적극적인 지지를 받고 있었다. 아인슈타인은 1905년에 발표한 **특수 상대성이론**(特殊相對性理論, theory of special relativity)에 이어서, 1915년 발표된 **일반 상대성이론**(一般相對性理論, theory of general relativity)에서 우주가 중력에 의하여 수축되는 것을 막기 위하여 이미 우주 상수를 도입해 놓은 상태였다. 그렇다면 허블은 어떻게 우주가 팽창한다는

사실을 알게 되었을까?

허블이 윌슨산 천문대에서 관찰한 별들은 별빛을 분석하는 분광기 속에서 그 유명한 **적색편이**(赤色偏移, red shift) 현상을 일으킨다는 것이다. 적색편이 현상이란 동일한 빛이 시간이 지남에 따라 그 파장이 길어져서 적색 쪽으로 이동한다는 것을 말한다. 보라색보다 적색이 파장이 길다는 것은 누구나 다 알고 있는 사실이다. 즉, 파장이 길어진다는 것은 그 빛을 내는 천체가 관찰자로부터 멀어져 간다는 것을 의미한다. 이런 현상은 **도플러 효과**(Doppler effect)로 확연히 설명된다. 그렇다면 도플러 효과가 무엇인지도 자세히 알아보도록 하자.

도플러 효과는 1842년 오스트리아 물리학자였던 **크ристи안 도플러**(Christian Doppler, 1803~1853)에 의하여 밝혀진 물리현상이다. 도플러는 한때 비엔나대학에서 유전학의 아버지로 불리는 **그레고어 멘델**(Gregor Mendel, 1822~1884)을 가르치기도 하였다. 도플러 효과는 파동을 만들어 내는 **파동원**(波動源, wave source)이 관찰자의 위치에 따라 진동수와 파장이 바뀌는 현상을 말한다. 이 현상은 우리 주위에서도 쉽게 관찰할 수 있다. 한여름 밤 양재천 산책길을 걷는다고 하자. 저 멀리 다리 밑에서 음악회가 열린다. 산책자가 음악회가 열리는 곳으로 가까이 갈수록 음악 소리가 더 크게 들린다. 그러나 음악회가 열리는 장소를 지나가면 음악 소리는 급격하게 작아진다. 이번에는 파동원이 움직이는 경우를 상정해 보자. 우리 곁으로 구급차가 사이렌을 울리며 지나간다. 구급차가 우리에게 다가올 경우는 소리가 점차 커지다가, 우리 곁을 지나치면 소리가 급격히 작아지는 것과 동일한 현상이다. 다시 정리하면 파동이 관찰자 쪽으로 다가오면 파장이 짧아지는 **청색편이**(靑色偏移, blue shift)가 일어나고, 관찰자로부터 멀어지면 파장이 길어지는 적색편이가 일어나는 것을 말한다. 차량의 속도를 측정하는 스피드 건(speed gun)도 이와 같은 원리를 이용한다. 심장 초음파도 혈류가 검사자 쪽으로 오는 경우와 멀어지는 경우를 측정함으로써, 심혈류가 정상적인 흐름인지 혹은 역류하는지를 보는 것과 동일한 현상이다. 결과적으로 허블이 우주가 팽창한다는 사실을 증명한 방법은 그렇게 어려운 방법이 아니란 것을 우리는 쉽게 알 수 있다.

허블은 구체적으로 별들이 멀어져 가는 거리를 **허블 상수**로 계산하였다. 허블 상수는 70km/sec/Mpc를 말한다. Mpc

는 메가파섹(mega parsec)을 의미하고 1파섹은 약 3광년이다. 따라서 1메가파섹은 약 300만 광년을 의미한다. 만약 한 별이 약 300만 광년 떨어져 있다면 그 별은 초속 70km의 속도로 떨어져 간다는 뜻이다. 다른 별이 약 3,000만 광년 떨어져 있다면 그 별은 초속 700km의 속도로 떨어져 갈 것이다⁴¹. 즉, 멀리 떨어져 있는 별일수록 더 빨리 떨어져 간다는 것을 발견한 것이다. 그러나 실제로 별들이 이동하는 것은 아니다. 이는 마치 고무풍선에 두 점을 그려 놓고 바람을 불어 넣으면 실제 점들은 가만히 있지만 고무풍선이 늘어나서 두 점이 멀어지는 것과 동일한 현상이다.

우주가 팽창한다는 사실은 과학계에 던져진 엄청난 충격이었다. 내가 좋아하는 오래된 사진 한 장을 소개하고자 한다. 그림 1-1은 캘리포니아 공과대학이 소장하고 있는 사진이다. 허블이 우주가 팽창한다는 사실을 공포하자, 아인슈타인이 직접 월슨산 천문대를 방문하여 망원경을 보면서 우주가 팽창한다는 사실을 확인하는 장면이다. 아인슈타인이 망원경을 보고 있고, 파이프를 물고 있는 사람이 허블이다. 아인슈타인은 나중에 정적인 우주, 즉 정상 우주론을 지지하기 위하여 억지로 우주 상수를 넣었던 것이 일생 최대 실수라고 인정하고 이를 철회하였다.

우주의 기원을 추적해 가는 데 공헌한 두 번째 과학자를 소개하고자 한다. **조지 가모프**(George Gamow, 1904~1968)는 흑해의 진주라 불리는 오데사(Odessa)에서 태어났다. 오데사



그림 1-1. 월슨산 천문대에서 허블(우)과 아인슈타인(좌). (출처: Caltech 문서보관소 제공⁴¹⁾)

는 우크라이나에 속해 있지만, 가모프가 태어난 시기에는 우크라이나가 제정 러시아에 점령당하고 있던 시절이었다. 따라서 그는 러시아 과학자로 불리기도 한다. 가모프가 레닌그라드대학에서 공부할 당시 그는 **알렉산더 프리드만**(Alexander Friedman, 1888~1925)의 지도를 받기도 하였다. 프리드만은 그 당시 프리드만 방정식을 도입하여 허블이 우주가 팽창한다는 사실을 발표하기 전에 이미 우주가 팽창한다는 사실을 주장한 바 있었다. 그러나 그는 크림반도로 실훈여행을 떠났다가 장염에 걸려 결국 요절하고 말았다. 그의 운명은 거기까지만 보자. 조지 가모프는 스탈린의 폭정에 못 이겨서 러시아를 탈출하기 위하여 유대인인 그의 아내와 흑해에서 카약을 타고 터키로 망명을 시도해 보기도 하였다. 그러나 날씨는 가모프를 도와주지 않았다. 그런 그가 우여곡절 끝에 마지막으로 정착한 곳은 미국의 조지워싱턴대학이었다. 가모프는 컴퓨터가 없던 시절, 수학에 능통한 **랄프 앨퍼**(Ralph Alpher, 1921~2007)를 대학원생으로 받아들이며 많은 업적을 발표하기 시작하였다.

가모프는 프리드만과 허블의 영향을 받아 우주가 팽창한다는 사실에 고무되어 있었다. 또한 그는 팽창하는 우주를 역으로 추적해 간다면, 그림 1-2처럼 한 점으로 모일 것으로 생각한 과학자 중의 한 사람이기도 하였다. 그가 앨퍼와 함께 1948년 발표한 우주의 탄생에 관한 예측들은 다음과 같다. 첫 번째 예측은 **우주 대폭발**, 즉 **빅뱅**(big bang) 이후 수분 안에 수소와 헬륨 핵이 만들어졌을 것이고, 두 번째는 그 당시 폭발했던 빛이 아직도 어디엔가 있을 것이라고 추정한 것이다. 그뿐만 아니라 그 빛은 이미 식어서 아마도 절대온도(부피가 0이 되는 가상의 온도, 단위 K)인 5K(-268℃) 정도의 온도를 가질 것으로 예측하였다. 그를 우주의 탄생 분야에서 중요한 과학자로 소개하는 이유는 그의 추측들이 모두 다 맞아떨어진다는 것이 밝혀졌기 때문이다. 빅뱅이란 용어는 빅뱅을 지지하는 학자들이 만든 것이 아니고, 이를 반대하고 정상 우주론을 주장하던 **프레드 호일**(Fred Hoyle, 1915~2001)이 지어준 이름이다. 호일이 케임브리지대학 교수로서 당대 최고 천문학자로 대접받던 시절, 그가 1949년 BBC 라디오에 출연하여 생명의 기원에 대하여 설명하던 중, 미국 쪽에서 불고 있는 우주 대폭발론을 의식하고 비아냥거리는 말투로 이를 빅뱅이

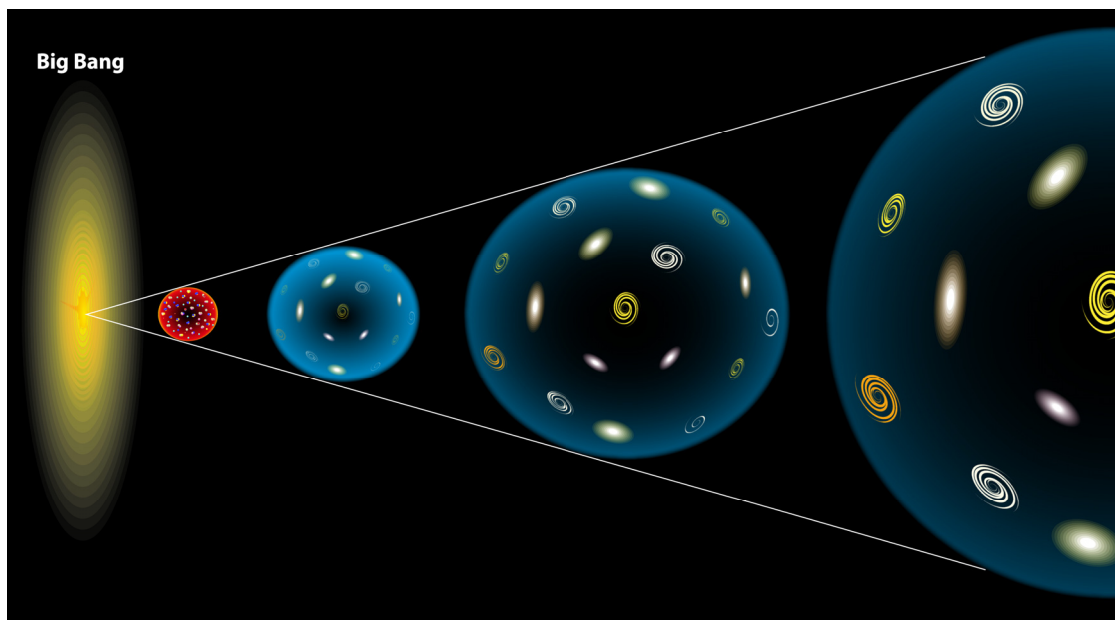


그림 1-2. 우주 팽창 모식도. (출처: Designua¹⁻²)

라고 부른 것에서 연유된 것이다. 이미 대서양을 사이에 두고 빅뱅 이론과 정상 우주론이 첨예한 과학적 논쟁거리로 등장하고 있었다는 증거이기도 하다¹.

호일은 또다시 빅뱅 이론이 해결하지 못했던 큰 난제를 대신 해결해 주어서, 오히려 빅뱅 이론이 우뚝 서게 해 준 일등 공신이 되기도 하였다. 빅뱅 이후 수소와 헬륨 원소가 만들어지지만, 우주가 팽창하면서 급격히 식어서 더 무거운 원소를 만들지는 못하였다. 그렇다면 더 무거운 원소들은 어떻게 만들어졌을까? 빅뱅 이론이 그 해답을 찾지 못하던 시절이었다. 호일은 무거운 원소가 만들어지기 위해서는 엄청난 고열이 필요하다는 것을 알았지만, 이런 고열을 발생시킬 장소를 우주에서 찾아야만 했다. 1967년 호일이 발표한 **별의 핵합성**(stellar nucleosynthesis, 항성 핵합성)은 별 속의 엄청난 고열이 무거운 원소를 만들어 내는 장소임을 알려 주었다. 이 사실은 다시 한번 빅뱅 이론을 수렁에서 건져 올려 준 셈이 되었다. 자세한 내용은 우주의 역사 및 별의 탄생 편에서 다시 다룰 것이다.

별의 핵합성이 발표되기 2년 전인 1965년, 빅뱅을 지지할 결정적인 사건이 또다시 발생한다. 우리는 한밤에 TV를 보다가 정규 방송이 끝나면 화면에 이상한 줄이 그어지면서 지직거리는 소리를 들어본 적이 누구나 한 번쯤 있을 것이다. 이

소리는 우주의 기원과 직결된 엄청난 비밀을 간직하고 있는 보물의 소리이다.

다시 무대를 미국 뉴저지주로 옮겨 보자. 이 시대는 1961년부터 시작된 미국의 아폴로 계획에 따라 미국과 소련 간의 우주탐사 경쟁이 불꽃을 튀기던 시절이었다. 밤하늘의 별을 쳐다보면 심심치 않게 움직이는 별들을 볼 수 있었던 때이다. 어느 나라의 인공위성인지는 알 수 없었지만 밤하늘을 가르며 날아가는 별들을 볼 수 있었다.

그 당시 벨 연구소에 근무하던 **아노 펜지어스**(Arno Penzias, 1933~)와 **로버트 윌슨**(Robert Wilson, 1936~)은 인공위성과 교신 중에 발생하는 지직거리는 잡음을 없애 보라는 과제를 받았다. 그들은 그림 1-3에서 보는 안테나를 집중적으로 점검해 보았다. 통신장비뿐만 아니라 안테나에 올라가 비둘기 배설물까지 청소했지만, 계속되는 잡음을 제거할 방법이 없었다. 더구나 그 잡음은 안테나를 어떤 쪽으로 돌려 보아도 들리는 **등방성**(等方性, isotropy)을 가지고 있었고, 어떤 쪽에서도 크기가 비슷하게 들리는 **균등성**(均等性, uniformity)까지 가지고 있었다. 이들은 이 소리가 심상치 않음을 직감적으로 느끼며 얼마 떨어지지 않은 프린스턴대학의 **로버트 디케**(Robert Dicke, 1916~1997) 교수에게 자문을 구하였다. 디케도 마침 이 소리를 찾기 위하여 대학원생을 동원하여 고물상에서 안테

나를 구하고 있을 즈음이었다. 디케가 그토록 찾고 싶어 했고 가모프도 예측한 이 소리는 바로 우주에 처음으로 등장한 그 빛이었다. 우리는 이 빛을 **우주배경복사**(宇宙背景輻射, cosmic microwave background radiation; CMB 혹은 CMBR)라고 부른다. 펜지어스가 측정한 우주배경복사의 온도는 약 절대 온도 3도(3K)였다. 우주배경복사의 발견은 정상 우주론과 빅뱅 우주론의 치열한 논쟁에서 빅뱅 우주론의 손을 들어 주는데 결정적 역할을 하게 되었다. 펜지어스와 윌슨은 우주배경복사를 발견한 공적으로 1978년 노벨 물리학상을 수상하였다. 그들은 수상 소감을 밝히면서 자신이 한 일은 안테나의 비둘기 배설물을 열심히 치운 것밖에 없다는 겸손함을 보이기도 하였다. 그러나 실제 우주배경복사를 예언한 가모프는 1968년 사망하여 노벨 수상의 영광을 누리지 못하였다⁴.

실제 우주배경복사의 마이크로파는 대기권에서 다수가 흡수되고 지상에 도달하는 양이 적어서, 이를 정확히 측정하기 위해서는 인공위성을 쏘아 올려야 한다는 결론에 도달하게 되었다. 드디어 1989년 미국항공우주국(national aeronautics & space administration; NASA)에서 **코비**(cosmic background explorer; COBE) 위성을 쏘아 올렸다. 코비 위성이 측정한 우주배경복사는 절대온도 2.725도(2.725K)였고, 이는 가모프가 측정한 5K, 펜지어스가 측정한 3K보다 더 정확해졌다는 것을 알 수 있다. 코비 위성이 측정한 2.725K의 우주배경복사는 **막스 플랑크**(Max Planck, 1858~1947)가 만든 **흑체복사**(黑體輻射, blackbody radiation) 스펙트럼과 완벽하게

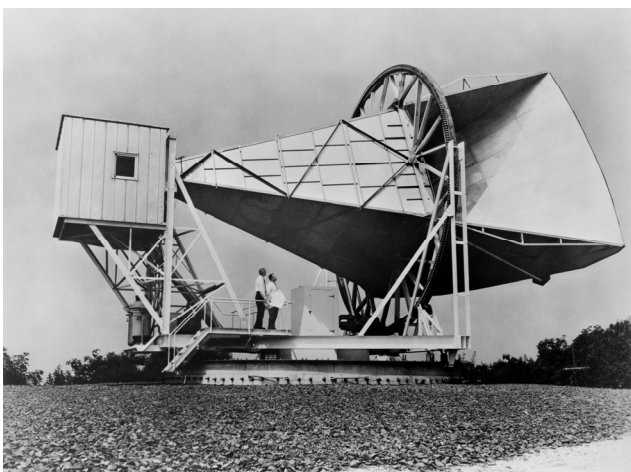


그림 1-3. 펜지어스와 윌슨이 최초로 빛을 찾아낸 안테나. (출처: Bammesek, NASA¹⁻³)

일치하게 되었다. 흑체복사 스펙트럼은 어떤 물체가 온도에 따라 정해진 주파수와 강도를 가진 빛을 발산하는 것을 말한다. 이것은 우주배경복사에 대한 과학적 신뢰도를 높이는 데 큰 공헌을 하게 되었다.

다시 미국은 2001년 **윌킨슨 마이크로파 비등방성 탐색기**(Wilkinson microwave anisotropy probe; WMAP)를 쏘아 올려 더 선명한 영상을 얻을 수 있었다. 그림 1-4의 사진은 WMAP가 만들어 낸 지도이다. 여기서 붉은 점으로 표시된 부분은 평균보다 뜨거운 점이고 푸른 점은 차가운 점들이다. 우리는 우주배경복사가 균일한 것으로 알았지만 위성이 보내 온 정보는 약간의 비균등성이 발견되었다. 약 10만분의 1, 즉 0.001%의 비균등성이 결국 현재의 우주를 만드는 데 결정적인 역할을 하였다는 것이 밝혀졌다. 비균등성은 물질과 반물질의 차이를 보여 주는 결과물이다. 이러한 물질과 반물질이 쌍소멸할 때 약간의 물질이 남게 되어서 현재의 우주를 만들어 낸 것이다. 만약 물질보다 반물질이 남게 되었다면 우주는 반물질 세계가 되었을 것이다. 2009년 유럽우주국(european space agency; ESA)에서 발사한 **플랑크**(Planck) 위성도 이러한 사실을 재확인하고 있다².

우주의 나이가 138억(정확히는 $13,799 \pm 0.021$ billion) 년이라는 것도 이들 위성이 알려 준 사실이다¹⁶. 인류가 우주의 나이를 정확히 알아낸 것도 이제 겨우 10년이 조금 넘어서고 있는 실정이다. 이들 위성을 연구하여 우주배경복사가 정확히 2.725K라는 것을 알아낸 **존 매더**(John Mather, 1946~)와 10만분의 1의 비균등성을 찾아낸 **조지 스무트**(George Smoot, 1945~)는 2006년 노벨 물리학상을 공동 수상하는 영예를 안

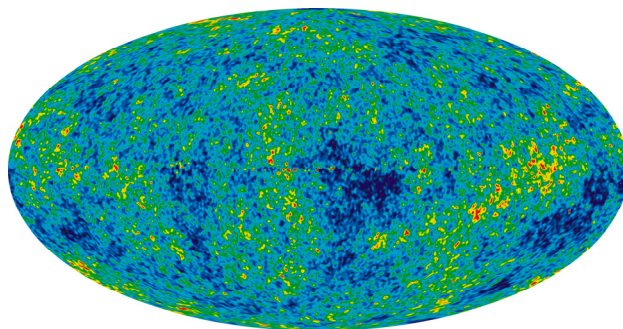


그림 1-4. WMAP 인공위성이 찍은 우주배경복사 사진. (출처: NASA/WMAP Science Team¹⁻⁴)

게 되었다. 이에 대한 자세한 설명은 우주의 역사 편에서 다시 다룰 것이다. 우리는 지금까지 과학의 역사를 통하여 우주가 인간의 상식 속으로 들어오게 된 경위에 대하여 알아보았다.

제2절 우주의 역사

우주는 물질과 에너지가 공존하고 시간과 공간이 절대적이지 않은 공간이다. 즉, 물질이 에너지가 되고 에너지가 물질이 되는 공간이다. 시간과 공간이 절대적이지 않은 것은 큰 중력체를 만나면 공간과 시간이 변한다는 것이다. 이는 아인슈타인의 일반 상대성 원리가 이들을 증명하고 있다. 지금부터의 내용들은 상당한 인내심이 요구된다. 내용이 딱딱하고 생소한 용어들이 많이 나오지만, 다음 단계를 이해하기 위해서 좀 더 집중할 필요가 있다. 우주의 역사에 대한 기술에 앞서 우주를 지배하고 있는 기본적인 4개의 힘과 함께 우주를 구성하고 있는 물질에 대한 표준모형(標準模型, standard model)을 간단히 설명하고자 한다(그림 1-5).

1. 우주의 기본 힘

우주를 지배하는 기본적인 힘은 4개로 설명된다¹⁴. 첫째는 우리가 보편적으로 거시세계(巨視世界, macro world)에서 느끼는 중력(重力, gravity force)이다. 중력은 질량을 가진 두

물체가 서로 끌어당기는 힘이다. 4개의 힘 중에서 가장 미약하지만, 그래도 사과를 땅으로 떨어지게 만들고, 태양이 불타게 만드는 힘이기도 하다. 따라서 중력의 세기를 결정하는 물리량은 당연히 질량(質量, mass)이다. 그러나 중력에 힘을 전달하는 입자(게이지 입자, gauge boson)인 중력자(重力子, graviton)는 아직 발견되고 있지 않다.

두 번째 힘은 전자기력(電磁氣力, electromagnetic force)이다. 전자기력은 중력과 같이 우리에게 익숙한 힘이다. 힘의 세기를 결정하는 물리량은 전하량(電荷量, electric charge)으로 표시되고, 힘을 전달하는 게이지 입자는 광자(光子, photon)이다. 원자는 원자핵과 전자로 이루어져 있다. 따라서 전자기력은 원자핵과 전자를 결합시키는 힘이 되기도 하고, 원자와 원자를 연결하여 분자를 결정하는 힘이 되기도 한다. 그러나 대부분의 물질에서 양전하와 음전하가 동일한 양으로 배치되어 있어서 실제로 힘을 느끼지는 못한다. 하지만 자기력은 쇠를 잡아당기고, 전기력은 벼락이 되어 물체를 파괴시키는 큰 힘으로 나타난다.

세 번째 힘은 강력 혹은 강핵력(強力, strong force, strong nuclear force)이다. 이 힘은 원자핵을 뭉치게 하는 강력한 힘이다. 수소를 제외한 모든 원소는 양성자가 2개 이상이다. 이런 양성자들은 양의 전하를 가지고 있어서 서로를 밀쳐 낸다. 따라서 이런 양성자들을 뭉치게 하기 위해서는 전자기력에 의한 전기적 반발력을 억누를 수 있는 더 강력한 힘이 필요할 것이다. 이 힘은 전자기력보다 100배 이상 강하고, 중력보다는 10^{38} 배나 강하다. 따라서 원자핵을 건드릴 때 나오는 강력한 힘은 이 힘을 바탕으로 한다. 이 힘을 매개하는 게이지 입자는 접착자(接着子, gluon)이다. 그러나 약력과 함께 원자 안에서와 같이 극미세계에서만 존재하는 힘이다. 마지막으로 약력(弱力, weak force)이다. 약력은 원자 붕괴를 일으키는 힘이다. 베타 붕괴와 같이 중성자를 양성자와 전자로 붕괴시키는 힘이 된다.

지금까지 우주를 지배하는 힘들을 나열하였지만, 이들을 다시 분류하여 묶을 수 있는 이론들이 있다(그림 1-6). 약력과 전자기력을 합친 것을 전약력통합 이론(electroweak theory)이라 하고, 전약력 이론에다 강력이 더해진 것을 대통합 이론(grand unified theory)이라고 한다. 만약 대통합 이론에다



그림 1-5. 물질의 기본 입자 표준모형. (출처: MissMJ, Cush, Fermilab¹⁻⁵)

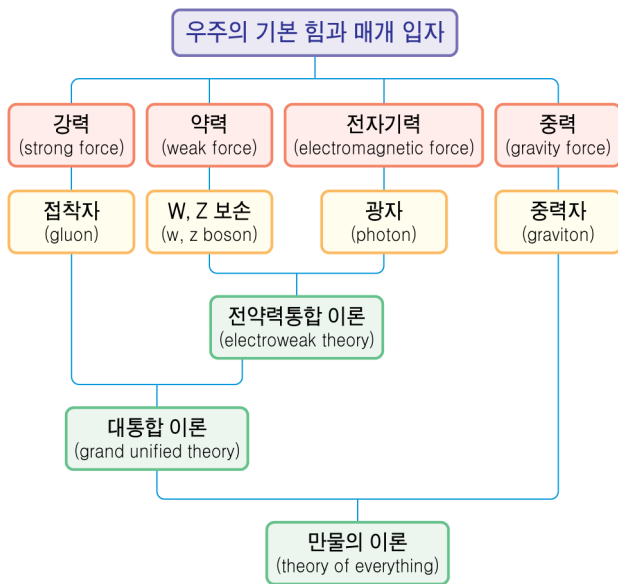


그림 1-6. 기본 힘을 설명하는 이론 및 매개 입자.

중력까지 더해진다면, 이를 우리는 **만물의 이론**(theory of everything)이라고 부를 수 있을 것이다.

2. 표준모형

우리는 다시 그림 1-5의 표준모형으로 돌아가서 이 우주를 형성하고 있는 가장 기본적인 물질에 대하여 알아볼 것이다⁴⁰. 분자는 원자로 구성되어 있고, 원자는 원자핵과 전자로 구성되어 있다. 다시 원자핵은 **양성자**와 **중성자**로 구성되어 있다는 것은 누구나 잘 알고 있다. 양성자는 전기적으로 1이라는 양의 전하를 가지고 있고, 중성자는 전기적으로 중성이다. 따라서 양성자는 전기적으로 -1이라는 음의 전하를 가진 전자와 같이 하나의 원자를 이루고 있다. 그렇다면 양성자와 중성자는 어떻게 구성되었으며, 이들은 어떻게 전기적으로 양성자가 되고 중성이 될 수 있을까?

양성자와 중성자는 **쿼크**(quark)라는 것으로 구성되어 있고, 이들은 **업 쿼크**(up quark)와 **다운 쿼크**(down quark)들로 구성되어 있다. 업쿼크는 2/3의 전하를 가지며 다운쿼크는 -1/3의 전하를 가진다. 양성자는 업쿼크 2개와 다운쿼크 1개로 구성되어 있다. 따라서 전하는 $2/3 + 2/3 - 1/3 = 3/3$, 즉 1이라는 양의 전하를 가진다. 대신 중성자는 업쿼크 1개와 다운쿼크 2개로 구성된다. 따라서 전하는 $2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$, 즉 0이라는 중성의 전하를 가질 수밖에 없다. 우리를 둘러싸고

있는 세상 만물은 모두 쿼크와 전자로 구성되어 있다고 해도 과언이 아니다. 표준모형에 들어 있는 기본 입자는 17가지이다. 2013년에 발견된 힉스 입자는 신의 입자라고 불리기도 한다²⁴. 힉스 입자는 모든 소립자에 질량을 부여하는 역할을 담당한다. 이 17가지 입자 중에서 업쿼크, 다운쿼크 및 전자를 빼고 나머지 소립자들은 모두 우주에 존재하거나 가속기 속에서 잠시 생성되었다가 사라지는 입자들이다. 나머지 입자들은 곧이어 설명할 것이다. 그럼 이제 우주의 시작점을 찾아갈 준비가 대충 끝난 것 같다.

3. 우주의 시작

허블이 주장한 우주 팽창은 그 역으로 되돌아가면 한 점으로 수축할 것이다. 이 한 점이 무엇인가? 한 점에서 시간, 공간, 물질 및 에너지가 만들어졌다는 것은 무엇을 의미하는가? 이 한 점을 찾아 들어가 보자(그림 1-7)^{9,10,42}.

1) 플랑크 시대(Planck epoch)

플랑크 시대는 빅뱅 이후 0초~ 10^{-43} 초 시간대를 의미한다. 우리가 이 시간을 표시해 본다면 아마도 거의 **무한소**(無限小, near infinitesimal)에 가깝지 않을까 생각된다. 이 시점은 상상할 수 없는 고열과 밀도를 가지고 있는 한 점이었을 것이다. 우리는 이 점을 일반 상대성 원리가 알려 주는 **중력 특이점**(重力特異點, gravitational singularity)이라고 부른다. 10^{-43} 초는 얼마나 짧은 순간일까? 소수점 밑에 0이 43개나 붙어야 하는 찰나이다. 이 시간을 우리는 **플랑크 시간**(planck time)이라고 한다. 이 시간은 현대 물리학이 정의할 수 있는 시간의 한계점으로도 볼 수 있다. 이때의 우주 크기는 10^{-35} m 정도였고, 이를 **플랑크 길이**(planck length)라 부른다. 또한 이 당시의 온도인 10^{32} K를 **플랑크 온도**(planck temperature)라 부르기도 한다. 이때는 4개의 기본 힘들이 모두 한군데 모여 있는 상태여서 만물 이론 상태를 유지하고 있었을 것이다. 또한 **암흑물질**(暗黒物質, dark matter), **암흑에너지**(dark energy)가 이때 나왔을 것으로 추정한다⁷.

2) 대통일 시대(Grand unification epoch)

대통일 시대는 우주 나이 10^{-43} 초~ 10^{-36} 초 사이를 말한다.

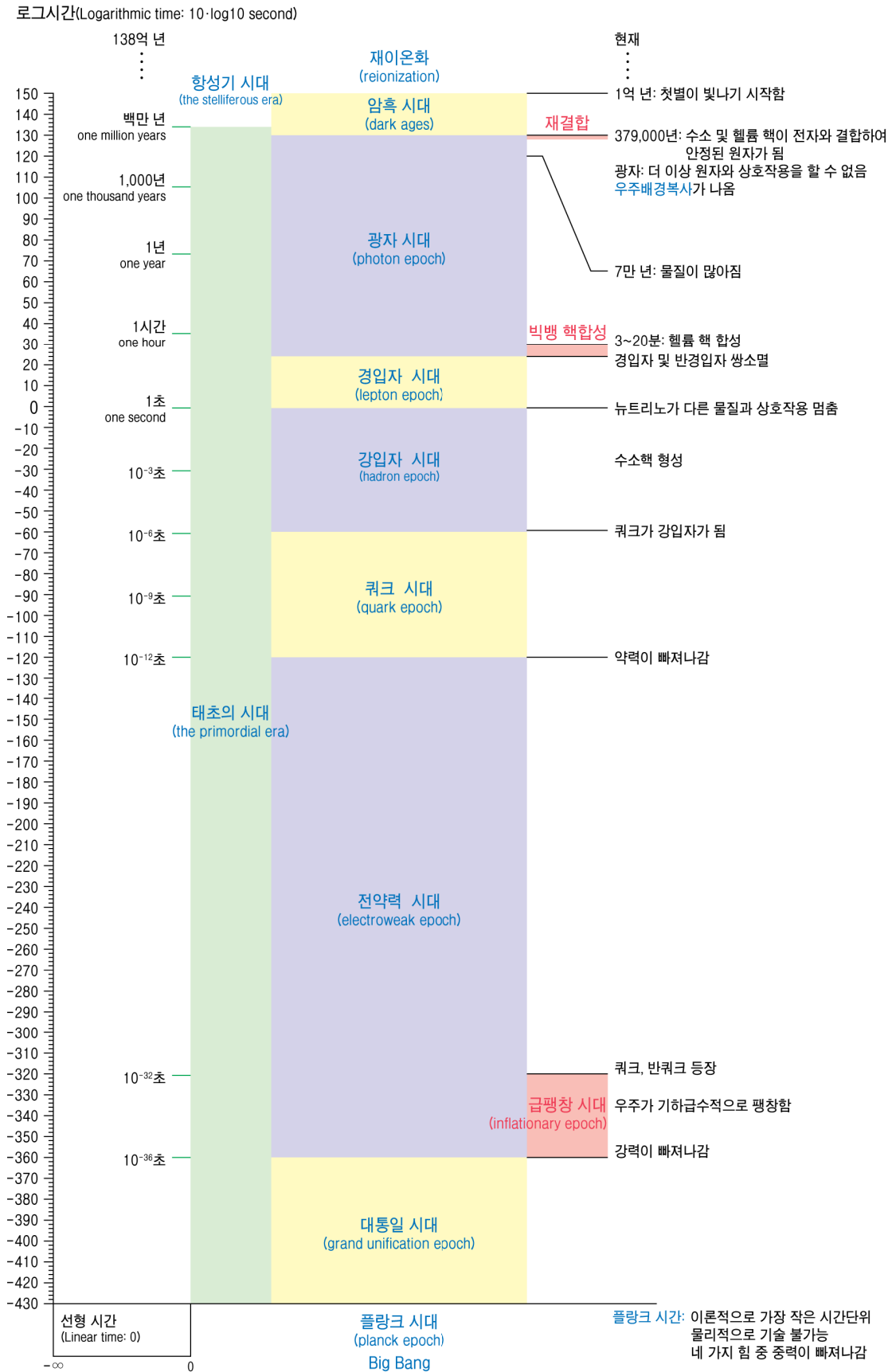


그림 1-7. 우주 탄생 순간의 시간대별 구분에 관한 모식도. (출처: Wikipedia¹⁻⁷⁾

이 시기가 시작되면서 4개의 기본 힘 중에서 **중력**이 빠져나가게 된다. 중력이 빠져나간 기본 힘은 대통일 이론이 될 것이다. 온도는 하강하여 10^{27} K까지 떨어졌지만, 온도가 너무 높아 빛과 입자가 모두 한 덩어리가 되어 있었을 것이다.

3) 전약력 시대(Electroweak epoch)

전약력 시대는 10^{-36} 초~ 10^{-12} 초 사이의 시간대를 말한다. 전약력 시대가 시작되자마자 4개의 기본 힘 중 중력에 이어 **강력**이 떨어져 나간다. 강력 분리는 초기 우주에 엄청난 변화를 초래하는 계기를 제공하였다. 1980년 매사추세츠공과대학의 **알란 구스**(Alan Guth, 1947~)의 발표에 의하면, 강력 분리는 **상전이**(相轉移, phase transition, 13장 참고)를 유발하여 엄청난 에너지가 방출되면서 급팽창이 일어났다는 것이다. 그의 계산에 따르면 우주의 지름은 약 10^{43} 배, 부피는 무려 10^{128} 배나 팽창하였다. 여기서 상전이는 물에서 나타나는 것과 같이 얼음에서 물로, 다시 물에서 기체로 변할 때 **잠열**(潛熱, latent heat)이 발생한다. 이 잠열은 상전이가 일어날 때마다 필요하기도 하고, 다시 방열되기도 하는 에너지다. 이러한 **우주 급팽창**(宇宙急膨脹, cosmic inflation)은 10^{-36} 초에서 10^{-32} 초 사이에 일어나고, 온도는 점차 식어서 10^{22} K 정도로 떨어진다. 표준모형에 등장하는 입자들은 모두 플라스마 상태를 유지하여 아직도 독립된 입자로 등장하지 못하고 있던 시절이다.

4) 쿼크 시대(Quark epoch)

쿼크 시대는 10^{-12} 초~ 10^{-6} 초 시간대이다. 이 시간대에서 비로소 약력이 전약력에서 떨어져 나가고, 전자기력만 남게 되어 현재와 같은 4개의 기본 힘으로 완성된다. 온도는 계속 떨어져서 10^{15} K로 떨어졌다. 현재 인간이 만든 최고의 구조물은 스위스 제네바의 **유럽입자물리연구소**(CERN, conseil européen pour la recherche nucléaire, european council for nuclear research)에 있는 거대강입자 충돌기(large hadron collider; LHC)이다. 이 충돌기가 만들어 내는 가장 높은 에너지 상태가 10^{12} K라는 사실은 인간이 우주 대폭발의 어느 지점까지 접근하고 있는지를 말해 주는 좋은 징표라 할 수 있다. 또한 이 시기는 입자들이 뭉쳐 있는 플라스마 상태에서

물질의 가장 기본이 되는 쿼크 등이 형성되는 시기이기도 하다. 이 쿼크는 쌍생성으로 반쿼크와 동시에 만들어진다. 그리고 이렇게 만들어진 쿼크와 반쿼크는 동시에 결합하여 쌍소멸되면서 빛으로 돌아갔을 것이다. 그러나 2001년 미국이 발사한 윌킨슨 마이크로파 비등방성 탐색기(Wilkinson microwave anisotropy probe; WMAP) 위성이 알려 주었듯이, 약 10억 개의 쌍소멸 중 1개 정도의 쿼크가 살아남아서 강입자 시대를 열어갈 입지를 마련해 주었다.

5) 강입자 시대(Hadron epoch)

강입자(强粒子, hadron) 시대는 10^{-6} 초~1초 사이의 시간대이다. 드디어 초기 우주가 1초대에 도달하게 되었다. 이때의 온도는 약 100억 K(10^{10} K) 정도로 떨어져서, 쿼크가 강입자인 양성자와 중성자를 형성할 수 있을 정도로 충분히 식게 되었다. 드디어 양성자와 중성자가 그 모습을 드러낸 것이다. 양성자가 만들어졌다는 것은 수소 원자의 원자핵이 만들어졌다는 것을 의미한다. 그러나 강입자와 반강입자들은 다시 쌍소멸되고, 10억 개 중에 1개 정도의 강입자가 살아남은 것이다. 이제 전자와 양전자만이 남아 있게 되었다.

6) 경입자 시대(Lepton epoch)

경입자(輕粒子, lepton) 시대는 1초~10초 사이의 시간대를 말한다. 전자와 양전자(陽電子, positron)도 서로 충돌하여 쌍소멸되고, 극소수의 전자만이 살아남는다. 따라서 우주에 남아 있는 입자는 이제 광자뿐일 것이다. 이때는 우주 온도가 식어서 10억 K 정도로 떨어져서, 대규모의 쌍소멸은 더 이상 일어나지 않게 되었다.

7) 광자 시대(Photon epoch)

광자 시대는 대폭발 이후 10초에서 380,000년 사이를 말한다. 대부분의 입자와 반입자는 사라지고 광자가 지배적인 시대에 도달한 것이다. 광자 시대가 시작된 지 약 3분 정도 지나 우주 온도는 더 식어서 10억 K 이하로 떨어지자, 양성자와 중성자가 결합하여 원자핵을 만들기 시작하였다. 우리는 이 시기를 우주 대폭발에 의한 **핵융합 시대**(Big Bang nucleosynthesis, 빅뱅 핵합성)라고 부른다. 빅뱅이 붙은 이유는 핵

융합 반응이 별에서도 일어나기 때문에 이것과 구분하기 위하여 붙은 이름이다. 이때 만들어진 원자핵은 양성자 1개로 구성된 수소와 양성자 4개로 형성된 헬륨 핵, 중수소와 극소수의 리튬(lithium) 등이다. 그러나 20분이 경과하자 우주 온도가 1천만 K 이하로 떨어지면서 더 이상의 핵융합은 일어나지 않게 되었다(이 1천만 K를 기억해 두자).

원래 양성자와 중성자가 형성된 비율은 8:1의 비율로 양성자가 많았다. 만약 양성자 16개와 중성자 2개가 있다면, 수소 원자핵 14개와 헬륨 원자핵 1개가 형성될 것이다. 따라서 질량비로 비교한다면, 수소 원자핵 대비 헬륨 원자핵이 차지하는 비율은 약 22%(4/14) 정도가 된다. 그러나 아직도 우주 온도가 여전히 높아서 원자핵이 전자와 결합하기에는 우주 에너지가 너무 큰 편이었다. 원자핵과 전자 그리고 광자는 서로 엉켜서 플라스마 상태로 존재하여 광자가 빠져나올 수 없는 상태에 놓여 있었다.

드디어 우주 온도가 약 3천 K에 도달하자 양전하를 띤 원자핵이 음전하를 띤 전자를 포획하여 원자를 만들기 시작하였다. 마침내 수소 원자와 헬륨 원자가 이 우주에 등장하는 순간이었다. 원자핵과 전자가 결합하자 전하로 꽉 차 있던 플라스마 상태는 맑아지고, 광자는 투명해진 우주를 드디어 빠져나올 수 있었다. 우리는 이와 같이 원자핵이 전자와 결합하는 것을 **재결합**(再結合, recombination)이라고 부른다. 재결합이란 의미는 원래 물질과 반물질이 한 덩어리로 있었는데는 것을 의미한다. 또한 이때 빠져나와 광활한 우주로 흩어진 최초의 빛을 우리는 우주배경복사라고 부른다. 펜지어스와 윌슨이 찾아내고 COBE 및 WMAP 위성이 사진을 찍은 그 우주배경복사는 이렇게 등장한 것이다. 우리는 원자핵과 전자에서 빛이 분리되는 과정을 **대분리**(大分離, decoupling)라고 부르고, 빅뱅에서 대분리 기간까지를 **초기 우주**(初期宇宙, early universe)라 부른다³.

8) 암흑 시대(Dark Age)

인류 역사에서도 중세 암흑기가 존재하듯이 우주의 역사에도 암흑 시대라 부르는 기간이 존재한다. 이 기간은 우주 대폭발 후 약 38만 년에서 1억5천만 년의 기간이다. 즉, 원자핵과 전자가 원자를 만들고, 투명해진 초기 우주에서 대분리가

일어나면서, 광자가 모두 빠져나간 우주 공간은 어둠 속에 잠기게 된다. 아무도 빛을 내는 물체가 없었기 때문이다. 이 암흑 시대는 첫 별이 등장하기까지 지속될 수밖에 없었다. 약 1억5천만 년이 지나자 드디어 첫 번째 별이 우주에 탄생하였다. 우주가 다시 밝아지면서 곧 별들의 시대가 도래할 것이다.

제3절

별의 탄생

1. 별의 역사

별들의 시대가 도래하는 데는 많은 진통이 따른다. 처음 등장하는 최초의 별은 오로지 수소와 헬륨과 같은 가벼운 원소들로 이루어진 별이었을 것이다. 따라서 이들은 엄청나게 큰 별이지만, 짧은 시간 안에 타 버려서 모두 초신성으로 폭발해 버렸을 것이다. 우주에 다시 밝은 불들이 일시적으로 켜졌지만, 식어 가던 우주가 이들 별들이 쏟아 내는 고열의 에너지로 다시 달구어지기 시작하였다. 수소 원자는 다시 양성자와 전자로 나누어져 **재이온화**(reionisation)가 되어 버렸다. 그러나 지속해서 팽창하는 우주는 점차 온도를 낮추어서 다시 별들이 등장하고, 최초의 은하가 생기기 시작하였을 것이다. 최초의 은하가 생긴 시점은 우주 대폭발 이후 약 10억 년이 지나서이다. 약 30억 년경에 **은하단**(銀河團, galaxy cluster)이 형성되고, 다시 50억 년이 경과될 무렵에 **초은하단**(超銀河團, galaxy supercluster)이 형성되었다. 태양계는 어떨까? 태양계의 나이는 46억 년이다. 그렇다면 태양계 속에 들어 있는 지구는 우주 대폭발 이후 92억 년 후에 만들어진 것이다. 따라서 우주 역사의 2/3 정도에서 우리의 지구는 존재하지도 않았다.

우리의 목적지는 ‘생명이란 무엇인가?’라는 질문에 대한 해답을 들려 주는 장소이다. 그런데도 불구하고 우리는 이 문제들을 해결하기 위하여 많은 시간을 우주의 기원과 별의 일생에 대하여 소비해야만 한다. 왜 이것이 생명을 이해하는 데 필수적인지에 대한 의문은 시간이 지나면서 점차 이해하게 될 것이다.

그림 1-8은 새로운 별이 탄생하는 과정을 나타내 주는 사진이다. 2014년 허블우주망원경이 촬영한 이 **독수리 성운**(Eagle Nebula, 혹은 M16)은 별들 사이에 있는 먼지와 가스 덩어리에서 별들이 만들어지는 장면을 보여 준다. 지구에서 약 7천