

정책연구 번호 00000

**노벨과학상 수상 연구주제의
형성 과정 분석을 통한
미래 유망 연구 주제 발굴 연구**
(Survey on Developing Research-Frontier
Topics focusing on Nobel Prize Winning
Research in Science)

연구기관: 고려대학교

연구책임자: 전 승 준

2012년 1월 31일



한국연구재단

제 출 문

한국연구재단이사장 귀 하

본 보고서를 정책연구용역과제인 “노벨과학상 수상 연구주제의 형성 과정 분석을 통한 미래 유망 연구 주제 발굴 연구”의 최종보고서로 제출합니다.

2012 년 1 월 31 일

- 연구기관명 : 고려대학교
- 연구책임자 : 전승준 (고려대학교)
- 공동연구원 : 조민행 (고려대학교)
- 공동연구원 : 박민아 (KAIST)
- 공동연구원 : 정성욱 (서울대학교)
- 연구협력관 : 장재혁 (고려대학교)

※ 본 보고서의 내용은 정책연구용역과제 연구팀의 의견이며, 한국연구재단의 공식적인 견해와는 다를 수 있습니다.

최종보고서 초록

관리번호				연구기간	2011년 6월 1일 ~ 2012년 1월 15일	
연구과제명	(한글) 노벨과학상 수상 연구주제의 형성 과정 분석을 통한 미래 유망 연구 주제 발굴 연구 (영문) Survey on Developing Research-Frontier Topics focusing on Nobel Prize Winning Research in Science					
연구책임자 (연구기관)	전승준 (고려대학교 화학과)	참 여 연구원수	총 5 명	연 구 용역비	40,000 천원	
요 약					190 면	
<ul style="list-style-type: none"> ○ 노벨상을 중심으로 우수 연구 주제 분석 <ul style="list-style-type: none"> ● 노벨위원회가 선호하는 특정 연구 분야(주제) 도출 ● 노벨과학상은 분야 발전의 일반적인 패턴을 보여줌 (현상발견 → 특성연구·이론화 → 응용 및 확장) ○ 미래 유망 연구주제 발굴 <ul style="list-style-type: none"> ● 징후적 지시자를 중심으로 단·중기 유망 주제 예측 ● 권위 있는 저널이나 과학자의 예측을 중심으로 장기 유망 주제 예측 ○ 우수한 연구주제를 형성한 노벨상 수상자 사례 연구 (10명) ○ 사례 연구를 통해 우수 연구주제를 형성하는 데 유용한 팁(Tip) 도출 <ul style="list-style-type: none"> ● Big Question을 항상 염두에 둘 것 ● ‘적절한 수준’의 선행 연구 리뷰 ● 동료와의 협력을 위한 활발한 커뮤니케이션 ● (본 주제 이외의) 2차 주제 탐색 ● 융합 연구를 위한 최신 혹은 타 분야의 분석 기구에 대한 관심 						
색인어	한글	노벨상, 연구주제, 연구문제형성, 유망주제				
	영어	Prospective Research Topic, Basic Science, Nobel Prize				

요 약 문

I. 제목

노벨과학상 수상 연구 주제의 형성 과정 분석을 통한 미래 유망 연구 주제 발굴 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

노벨상은 기초 과학 연구 발전에 있어 최종 목표가 될 수는 없지만, 노벨상 수상은 전체 과학기술 발전을 위한 견인차의 역할을 할 수 있다. 따라서 노벨상을 기초 과학 연구 발전의 동인으로 간주하여 이를 활용하여 기초 연구를 진작시킬 수 있는 정책적 연구 및 지원 방안을 모색하는 연구가 필요하다. 즉, 노벨상 수상목적이 아니더라도, 노벨상을 탈 만한 우수 연구에 초점을 맞춰 우수 연구가 가능한 조건을 분석하고 지원해 주는 방향에서의 접근이 이루어져야 한다는 것이다.

본 연구에서는 노벨상 수상 연구들을 중심으로 우수 연구 주제 형성 과정에 대한 분석을 시도한다. 기초과학분야의 연구 역량을 제고하고 세계적인 수준의 연구를 배출하기 위한 정책적 지원 프로그램을 만들기 위해서는 참신한 문제를 선택하고 그것을 가치 있는 연구 주제로 형성해 나가는 과정 자체에 대한 연구가 선행되어야 한다. 본 정책 연구에서는 노벨과학상 수상 등을 통해 그 우수성이 입증된 기초과학분야의 연구주제들과 역사적으로 높이 평가받은 대표적 연구 성과들을 분석 대상으로 삼아 연구주제의 특성을 분류하고, 이 중 대표적인 연구 사례들을 선택하여 각 연구자들이 그 연구주제를 형성해 나간 과정을 비교, 분석한다. 이를 토대로 중단기, 장기 미래 유망 연구 주제를 발굴하고, 우수 연구 주제 형성을 가이드할 수 있는 제안을 도출하는 것을 목표로 한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 우수 연구 주제에 대해 두 방향에서 접근을 시도한다. 첫째, 노벨과학상을 수상한 연구들에 대한 주제 분석을 통해 중단기와 장기로 나누어 미래 유망 주제를 도출한다. 둘째, 노벨상 수상 과학자들의 주제 형성 과정에 대한 사례 분석을 통해 노벨상으로 대표되는 우수 연구 주제의 형성 과정을 분석한다. 각각에 대한 구체적인 연구 내용 및 방법은 아래와 같다.

○ 우수 연구 주제 분석 및 유망 주제 도출

본 연구에서는 노벨과학상 연구의 주제들을 조사하고 그 주제의 특징을 분석한 뒤, 이를 기반으로 중단기와 장기로 나누어 미래 유망 연구 주제들을 도출한다. 구체적으로 다음과 같은 연구들을 수행한다.

- 노벨과학상 연구 주제들의 전반적인 특징 분석
- 1980년대 이후 노벨과학상 수상 연구들의 주제 및 패턴 분석을 통한 단기 유망 주제 도출
- 울프상, 톰슨 로이터 인용상, 노벨 심포지엄 등 노벨상의 징후적 지시자 분석을 통한 중단기(10년 이내) 유망 주제 도출
- 권위 있는 저널이나 과학자의 전망을 분석한 장기(10-20년 이후) 유망 주제 도출

○ 우수 연구주제 형성 과정에 대한 사례 연구

노벨과학상을 수상한 연구자들의 자서전, 전기, 노벨상 수상 강연 등을 바탕으로 노벨상 수상자들이 연구 문제를 형성해 나간 과정에 대한 사례 연구를 수행한다. 그들이 특정한 연구 주제를 선정하여 구체적인 문제를 도출해 내는데 있어 어떤 요인들이 영향을 미쳤는지를 분석함으로써, 공통적인 요인 및 조건을 도출한다. 이 공통적인 조건으로부터 과학자들의 연구 주제 형성에 도움이 될 만한 실천적인 제안들을 이끌어낸다.

IV. 연구개발 결과

10년 이내에 과학계의 각광을 받을 만한 중단기 유망 주제는 노벨과학상의 가능한 후보들에 대한 조사를 통해 예측했다. 노벨과학상 수상 후보 예측에는 소위 노벨상의 ‘징후적 지시자’라고 하는 지표가 사용되었다. 노벨상의 ‘징후적 지시자’는 노벨상 수상과 상관성이 높은 일종의 지표들을 지칭하는 것인데, 본 연구에서는 그 상을 탄 이후 노벨상을 타는 빈도가 높은 울프상과 래스커상, 논문 인용 지수에 기초하여 발표되는 톰슨 로이터의 인용상, 노벨위원회의 주관으로 개최되는 노벨 심포지엄을 그 징후적 지시자로 사용했다. 이렇게 해서 나온 결과는 물리, 화학, 생리의학 세 분야에서 각각을 다시 4-6개의 하위 분야로 나누어 정리했다(세부 결과는 2장을 참고할 것).

10년 이상의 미래에 유망할 것으로 예상되는 장기 유망 주제는 과학계의 석학들의 견해나 *Science*, *Nature*, *Scientific American* 등의 권위 있는 저널의 기사, 정부 보고서 등을 기초 자료로 조사했다(세부적인 내용은 2장 참고). 이를 종합하여 물리, 화학, 생리의학 분야의 미래 유망 주제를 큰 카테고리 정리한 결과는 다음과 같았다.

물리	입자의 구조, 더 나아가 근본적인 대통일장 이론의 유효성 여부 우주의 근원과 구조 새로운 응집물질의 개발과 그 이론 양자역학의 더욱 근본적인 이해와 그 응용 생명체를 포함한 복잡계의 물리학적 이해
화학	분자 수준에서 다양한 화학 반응의 이해 원하는 성능과 구조의 화합물의 효율적 합성 방법 에너지의 효율적 생산과 저장, 활용을 위한 화학 환경 친화적인 화학 반응 고안 복잡한 생체 화학 반응의 근본적 이해를 통하여 의약품 개발
생리의학	인간의 면역체계의 근본적인 이해와 이를 응용한 새로운 질병 대응 연구 유전자로부터 각종 생리 현상의 분자 수준 이해 세포 내의 복잡한 반응 네트워크의 근본적인 이해

인간의 주요 질병의 근본적 원인과 치료법
노화의 원인 규명과 장기를 대체하는 연구
인식의 과학적 규명 등 뇌 연구
생리학 연구에 중요한 진전을 보일 수 있는 연구 방법 또는 장비 개발

본 연구에서는 노벨과학상 수상자들의 연구 문제 형성 과정에 대한 사례 분석을 통해 좋은 연구 문제를 형성하는 데 도움이 되는 중요한 팁들을 제시했다. 그것을 정리하면 다음과 같다.

- Big Question을 항상 염두에 둘 것
- ‘적절한 수준’의 선행 연구 리뷰
- 동료와의 협력을 위한 활발한 커뮤니케이션
- (본 주제 이외의) 이차 주제 탐색
- 융합 연구를 위한 최신 혹은 타분야의 분석 기구에 대한 관심

V. 연구개발 결과의 활용 계획

본 연구 결과는 기초 과학의 장기적 육성을 위한 정책적 제언으로 활용될 수 있다. 중단기 및 장기 유망 주제 선정 결과로부터 다음과 같은 정책적 함의를 도출할 수 있다.

첫째, 중단기 유망 주제로 선정된 연구들은 이미 저명 학자들에 의해 선점되어 있을 가능성이 높다. 이와 같은 주제의 경우 응용과 활용 목적이 아닌, 기초적이고 사소한 세부 주제를 연구하는 것은 큰 의미가 없으므로, 정부의 연구 지원 시스템에서 이 점을 고려할 필요가 있다.

둘째, 중단기 유망 주제 조사에 따르면 5-10년 이내에 노벨과학상 후보로 점쳐지는 학자 중에는 한국 학자가 거의 포함되어 있지 않다. 따라서 정부의 노벨과학상 수상을 위한 지원은 최소 15-20년, 현실적으로는 그보다 더 먼 미래를 겨냥해야 할 것이다.

셋째, 장기 유망 주제들에 대한 연구의 경우 장기적으로 창의적이고 도전적인 연구를 할 수 있도록 지원해 주는 연구지원시스템이 확립되어야 할 것이

다. 장기 유망 주제들은 실패 위험성이 높지만 그 보상 또한 크므로, 단기적인 실패를 용인해 주는 연구 지원 시스템이 마련되어야 할 것이다.

Summary

This paper aims to provide a list of prospective research topics in basic sciences and some tips for shaping good research topics. We use Nobel laureates' research in physics, chemistry and physiology or medicine as a collection of excellent research topics which have been proved by Nobel prize. Also we analyze a pattern of the research topics of Nobel laureates since 1980.

We categorized prospective research topics into a short and mid term (in 10 years) list and a long term (after 10 years) list. For a short and mid term list, research topics of recent winners of Wolf Prize and Lasker Prize, two of authoritative prize in basic sciences, research topics of Thomson-Reuter citation laureates and recent topics covered by Nobel Symposium were analyzed. From this analysis, we list up prospective research topics with high probability of winning Nobel Prize within next 10 years. For a long term list, we examine opinions of scientific authority, scientific journals' reports and an official report submitted to Korean government which deals with prospective research topics in basic sciences. From this data, we list 4~6 research topics in physics, chemistry, and biology (physiology and medicine), respectively [See Ch. 2 for detailed lists].

We provide some tips for how to make good research questions by studying cases of ten Nobel laureates. We examine their autobiographies and Nobel lectures presented at Nobel prize ceremonies, and biographical materials. From this investigation, we find out common factors which contributes to their making of good research questions and provide them as a form of some advices [See Ch. 3 for details].

Based on our finding, we propose some suggestions for effective government's strategy to support and foster excellent research in basic science. We emphasize that government' support for basic science should be focused on a list of long term prospective research topics rather than a short and mid term topics, because the latter

has already taken by other renowned scholars abroad. And we also emphasize that the government should support long term research and admit honorable failure. We also propose heuristic and pedagogical uses of our finding.

Table of Contents

Ch 1. Purpose and Necessity of Study	1
1. Purpose of Study	1
2. Methods for Study	3
Ch 2. Analysis for Finding Good Research Topics	5
1. Investigating the Way of Classifying Research Topics	5
A. Classifying by Stages	5
B. Classifying by Types	8
C. How to Classify Research Topics	10
2. Investigating the Promising Research Topics from Nobel Prize in Science	12
A. Indicators of Nobel Prize in Science	12
(1) Wolf Prizes and Lasker Awards	12
(2) Thomson Reuters Citation Laureate	13
(3) Nobel Symposium	14
B. Nobel Prize and Searching for Good Topics in Physics	24
(1) General Features of Nobel Prizes in Physics	24
(2) Classifying the Physics Topics Favored by Nobel Committee Since 1980s	30
(3) Finding Promising Topics in the Future Through Analysing Indicators	40
C. Nobel Prize and Searching for Good Topics in Chemistry	51
(1) General Features of Nobel Prizes in Chemistry	51
(2) Classifying the Chemistry Topics Favored by Nobel Committee Since 1980s	53
(3) Finding Promising Topics in the Future Through Analysing Indicators	63
D. Nobel Prize and Searching for Good Topics in Physiology and Medicine	75
(1) General Features of Nobel Prizes in Physiology or Medicine	75
(2) Classifying the Physiology(Medicine) Topics Favored by Nobel Committee Since 1980s	78

(3) Finding Promising Topics in the Future Through Analysing Indicators	87
Ch 3. Investigation of the Development Process of Good Research Topics	95
1. Why is the Development of Research Topics Important?	95
2. Investigation of Development Process of Good Research Topics: In Cases of Nobel Laureate	101
A. Werner Heisenberg	101
B. Lev D. Landau and Landau School	104
C. Steven Chu	106
D. Andre Geim	108
E. Richard E. Smalley	110
F. Osamu Shimomura	113
G. Roger Y. Tsien	115
H. George E. Palade	116
I. Tonegawa Susumu	119
J. Peter C. Doherty	122
3. Tips for Developing Good Research Topics	125
Ch 4. Use of the Study	132
1. Use in Policy	132
2. Use in Education	137
Reference	138
Appendices	142

목 차

제 출 문	i
초 록	ii
요 약 문	iii
Summary	viii
Table of Contents	x
1장. 연구 목적 및 필요성	1
1. 연구 목적	1
2. 연구 내용 및 방법	3
2장. 우수 연구 주제 발굴을 위한 분석	5
1. 연구 주제 분류 방식 조사	5
가. 문제 단계별 분류	5
나. 문제 유형별 분류	8
다. 연구 주제 분류 방식	10
2. 노벨과학상을 중심으로 한 유망 주제 조사	12
가. 우수 연구 주제의 지표: 징후적 지시자	12
(1) 울프상과 래스커상	12
(2) 톰슨-로이터 인용상	14
(3) 노벨 심포지엄	14
나. 노벨 물리학상을 중심으로 본 우수 주제	24
(1) 노벨 물리학상의 일반적 특징	24
(2) 1980년대 이후 노벨위원회가 주목한 물리학 연구주제 분류	30
(3) 징후적 지시자 분석을 통한 미래 유망 연구주제 발굴	40
다. 노벨 화학상을 중심으로 본 우수 주제	51
(1) 노벨 화학상의 일반적 특징	51

(2) 1980년대 이후 노벨위원회가 주목한 화학 연구주제 분류	53
(3) 징후적 지시자 분석을 통한 미래 유망 연구주제 발굴	63
라. 노벨 생리의학상을 중심으로 본 우수 주제	75
(1) 노벨 생리의학상의 일반적 특징	75
(2) 1980년대 이후 노벨위원회가 주목한 생리의학 연구주제 분류	78
(3) 징후적 지시자 분석을 통한 미래 유망 연구주제 발굴	87
3장. 우수 연구 주제 형성 과정 탐구	95
1. 왜 연구 문제 형성이 중요한가?	95
2. 노벨상 수상자들의 우수 연구 주제 형성 사례 연구	101
가. 하이젠베르크	101
나. 란다우와 란다우 학파	104
다. 스티븐 추	106
라. 앙드레 가임	108
마. 리처드 스몰리	110
바. 오사무 시모무라	113
사. 로저 켄넬	115
아. 조지 펄라디	116
자. 도네가와 스스무	119
차. 피터 도허티	122
3. 우수 연구 문제 형성을 위한 제언	125
4장. 연구 활용 방안	132
1. 정책적 활용 방안	132
2. 교육적 활용 방안	137
참고문헌	138

< 부록 차례 >

부록1. 노벨과학상 수상 목록	142
부록2. 울프상, 래스커상 목록 (1980년 이후)	160
부록3. 톰슨-로이터 인용상 수상자 목록	174
부록4. 노벨심포지엄 참석자 중 노벨상 수상자 명단	182
부록5. 노벨상 심사과정과 노벨위원회 위원 명단 (1990년 이후)	186

표 차례

표 1. Cha-Cha-Cha 이론에 따른 과학적 발견의 세 가지 유형	9
표 2. 노벨과학상 분석을 위한 주제 유형 분류	11
표 3. 울프상과 래스커상 수상자의 노벨과학상 수상 비율	13
표 4. 물리학 분야 노벨 심포지엄	16
표 5. 화학 분야 노벨 심포지엄	17
표 6. 생리학 분야 노벨 심포지엄	17
표 7. 2000년 이후 노벨 물리학상을 예측한 징후적 지시자	20
표 8. 2000년 이후 노벨 화학상을 예측한 징후적 지시자	21
표 9. 2000년 이후 노벨 생리학상을 예측한 징후적 지시자	22
표 10 입자물리학	33
표 11 천체물리학	35
표 12 응집물질 연구	36
표 13 광학	38
표 14 원자분자 / 통계 / 기타 장비관련 물리	39
표 15 반응속도 및 반응 동역학	55
표 16 화학결합과 반응 이론 연구	57
표 17 유기합성	58
표 18 단백질 등 생화학 반응 및 구조 연구와 분석법	60
표 19 핵산의 분석 및 기능	61
표 20 고분자(거대분자)화학/재료화학/기타	62
표 21 면역학	80
표 22 유전(자) 조절 분야	82
표 23 세포생리학	84
표 24 기타분야	86

그림 차례

그림 1. 문제의 단계에 따른 분류	7
그림 2. 20세기 노벨 물리학상의 분야 별 분류	28
그림 3. 노벨 물리학 수상 연구 중 실험물리학 대 이론물리학의 비율	29
그림 4. 탐구의 바퀴(Inquiry Wheel)	97

1장. 연구 목적 및 필요성

1. 연구 목적

최근 한국에서는 노벨과학상 수상에 대한 기대가 커지고 있다. 우리나라의 ‘국격’에 맞게 이제 과학 분야에서도 노벨상이 배출될 시기가 되지 않았는가 생각하는 것이다. 이에 맞춰, 정부와 대학, 연구기관들에서도 노벨과학상 수상자 조기 배출을 위한 다양한 정책적 연구와 지원책을 마련하고 있다.¹⁾

하지만 노벨과학상이라는 지나치게 좁은 목표를 설정해 놓고 이를 위해 지원을 집중하는 것에 대해 문제를 제기하는 사람들도 있다. 노벨상 수상은 훌륭한 연구 성과의 결과이자 명예로 간주되어야지, 그것 자체가 목표가 될 수는 없다는 것이다. 훌륭한 연구 성과가 최종 목표가 되고 이를 위한 연구 지원 체계가 정책적으로 마련되어야 함에도 불구하고, 좋은 연구 성과는 부산물로 취급되고 오히려 노벨상이 주인공이 되는 주객전도의 상황이 벌어지고 있다는 것이다.

노벨상에 지나치게 목을 매는 듯한 모습이 오히려 ‘국격’을 떨어뜨릴 수도 있다는 지적도 제기된다. 일본의 경우 노벨과학상 수상 증대를 위해 2001년 제 2차 과학기술기본계획에 향후 50년 간 노벨상 수준의 국제적 과학상 수상자 30명 배출을 목표로 설정하고 정부 차원에서 활발한 활동을 펼쳤으나, 이런 활동이 지나쳐 오히려 국제 과학계의 비웃음을 사기도 했다.²⁾ 이에 따라

1) 임경순 등, 『노벨과학상 분석 및 접근전략 연구(위탁사업: 2008-36)』 (교육과학기술부, 2008); 차두원·이종률·장인호, 『노벨과학상 수상 현황 분석과 우리의 대응 방안(ISSUE PAPER 2010-15)』 (KISTEP, 2010).

2) Robin McKie, “Japan's Nobel ploy riles Swedes” *Guardian* (2011. 12. 16) <http://www.guardian.co.uk/world/2011/dec/16/japan.internationaleducationnews> (2012. 1. 15. 접속)

일본 과학기술종합회의는 제 4차 과학기술기본계획(2011-2015)에서 과학기술계의 품위를 떨어뜨린다는 이유에서 노벨상 목표를 삭제하기로 결정했다.³⁾

이런 비판들을 고려하더라도, 노벨과학상 수상을 위한 각종 정책적 연구와 지원책들이 낳는 효과를 무시하기는 힘들다. 국제적인 비웃음을 사기는 했지만, 일본 정부가 노벨상 수상을 목표로 다양한 사업을 추진한 결과 2000년대에 일본인의 노벨상 수상이 증가하여 일본의 과학 기술력을 다시 한 번 세계에 입증시키는 데 성공했다. 이를 보면, 노벨상이 과학 기술 기초 연구 발전에 있어 최종 목표가 되지는 말아야 하지만, 노벨상 수상이 전체 과학기술 발전을 위한 견인차의 역할을 한다는 점 또한 분명하다. 따라서 노벨상을 기초 과학 연구 발전을 위한 일종의 동인으로 여기고, 이를 활용하여 기초 연구를 진작시킬 수 있는 정책적 연구 및 지원 방안을 모색해 보는 방향으로의 방향 전환이 필요하다고 할 수 있다. 즉, 노벨상이 아니라, 노벨상을 탈 만한 우수 연구에 초점을 맞춰, 우수 연구가 가능한 조건을 분석하고 지원해 주는 방향에서의 접근이 이루어져야 한다는 것이다.

그동안 정부에서는 우수 연구가 나올 수 있도록 하는 경제적 조건에 초점을 맞춰왔다. 즉 뛰어난 연구자들이 돈 걱정을 하지 않도록 생계 지원과 연구비 지원을 해 주는 쪽으로 우수 연구자 지원을 해 왔다. 하지만 우수 연구가 이루어질 수 있는 환경 조건은 단지 재정적인 지원의 문제만은 아닐 것이다. 우수한 연구에 대한 분석을 제공하여 발견법적(heuristic)인 안목을 키워주고 연구 주제를 찾고 해결하는 데 있어 좀 더 전략적이며 효율적인 접근을 할 수 있도록 도와주는 것도 우수 연구자에 대한 체계적 지원 시스템의 일부로 포함되어야 할 것이다.

이와 같은 점을 고려하여, 본 연구에서는 노벨상 수상 연구 주제들을 중심으로 우수 연구 주제 형성 과정에 대한 분석을 시도한다. 우수한 연구는 연구

3) 차두원, “세계 29번째 노벨과학상 수상국을 위한 도전 기초과학과 창조형 R&D가 비결”, 『Science & Technology: Focus』 Vol. 77 (2011. 1), 10쪽.

방법과 연구 결과 이상으로, 그 주제의 우수성에서 연유하는 경우가 많다. 즉, 이미 나온 선행 연구의 주제를 쫓아가기보다 새로운 주제와 연구 영역을 개척해 나갔는가의 여부가 연구의 우수성을 결정짓는 중요한 기준이라 할 수 있다.

기초과학분야의 연구 역량을 제고하고 세계적인 수준의 연구를 배출하기 위한 정책적 지원 프로그램을 만들기 위해서는 참신한 문제를 선택하고 그것을 가치 있는 연구 주제로 형성해 나가는 과정 자체에 대한 연구가 선행되어야 한다. 본 정책 연구에서는 노벨과학상 수상 등을 통해 그 우수성이 입증된 기초과학분야의 연구주제들과 역사적으로 높이 평가받은 대표적 연구 성과들을 분석 대상으로 삼아 연구주제의 특성을 분류하고, 이 중 대표적인 연구 사례들을 선택하여 각 연구자들이 그 연구주제를 형성해 나간 과정을 비교, 분석한다. 이를 토대로 중단기, 장기 미래 유망 연구 주제를 발굴하고, 우수 연구 주제 형성을 가이드할 수 있는 제안의 도출을 목표로 한다.

2. 연구 내용 및 방법

본 연구에서는 우수 연구 주제에 대해 두 방향에서 접근을 시도한다. 첫째, 노벨과학상을 수상한 연구들에 대한 주제 분석을 통해 중단기와 장기로 나누어 미래 유망 주제를 도출한다. 둘째, 노벨상 수상 과학자들의 주제 형성 과정에 대한 사례 분석을 통해 노벨상으로 대표되는 우수 연구 주제의 형성 과정을 분석한다. 각각에 대한 구체적인 연구 내용 및 방법은 아래와 같다.

○ 우수 연구 주제 분석 및 유망 주제 도출

노벨상 수상 연구들은 그 주제의 우수성이 검증된 연구들이라 할 수 있다. 따라서 노벨상 수상 연구들의 주제는 우수한 연구 주제가 무엇인지를 볼 수 있는 창을 제공해 준다. 따라서 본 연구에서는 그 가치가 이미 입증된 노벨과학상 연구의 주제들을 조사하고 그 주제의 특징을 분석한 뒤, 이를 기반으로

단기와 중장기로 나누어 미래 유망 연구 주제들을 도출한다. 구체적으로 다음과 같은 연구들을 수행한다.

- 노벨과학상 연구 주제들의 전반적인 특징 분석
- 1980년대 이후 노벨과학상 수상 연구들의 주제 및 패턴 분석을 통한 단기 유망 주제 도출
- 울프상, 톰슨 로이터 인용상, 노벨 심포지엄 등 노벨상의 징후적 지시자 분석을 통한 중단기(10년 이내) 유망 주제 도출
- 권위 있는 저널이나 과학자의 전망을 분석한 장기(10-20년 이후) 유망 주제 도출
- 국내 전문가로부터 결과 자문

○ 우수 연구주제 형성 과정에 대한 사례 연구

노벨과학상을 수상한 연구자들의 자서전, 전기, 노벨상 수상 강연 등을 바탕으로 노벨상 수상자들이 연구 문제를 형성해 나간 과정에 대한 사례 연구를 수행한다. 그들이 특정한 연구 주제를 선정하여 구체적인 문제를 도출해 내는데 있어 어떤 요인들이 영향을 미쳤는지를 분석함으로써, 공통적인 요인 및 조건을 도출한다. 이 공통적인 조건으로부터 과학자들의 연구 주제 형성에 도움이 될 만한 실천적인 제안들을 이끌어낸다.

2장. 우수 연구 주제 발굴을 위한 분석

1. 연구 주제 분류 방식 조사

우수한 연구 주제(research topic)를 찾는 일은 좋은 질문을 만들어내는 것과 같다. 따라서 우수 연구 주제 발굴을 위해 가장 선행되어야 하는 것은 어떤 질문이 좋은 질문인지를 판별할 수 있는 기준을 세우는 것이다. 연구 주제의 유형을 여러 기준을 통해 분류해 보는 작업은 이런 기준을 세우는 데 도움이 된다. 주제의 종류에 따라, 혹은 연구의 수준이나 단계에 따라 적합한 질문의 형태는 달라질 것이다.

이 절에서는 만들어진 질문을 평가할 수 있는 기준을 제시한 로버트 루트번스타인(Robert Root-Bernstein)의 주제 유형 분류 방식과 과학적 발견의 유형을 분류할 수 있는 기준을 제시한 다니엘 코쉬랜드(Daniel E. Koshland)의 'Cha-Cha-Cha 이론'을 조사하고, 이를 토대로 노벨과학상 수상 연구 주제 분류에 적용할 수 있는 연구 주제 분류 방식을 도출할 것이다.

가. 문제 단계별 분류

『생각의 탄생』의 작가로 유명한 루트번스타인은 우수한 연구의 첫 걸음으로 좋은 질문 만들기의 중요성을 강조한 바 있다.⁴⁾ 그는 창의성에 대한 대부분의

4) Robert Root-Bernstein, "Problem Generation and Innovation," in Larisa V. Shavinina (ed.) *International Handbook on Innovation* (Elsevier Science Ltd., 2003), pp. 170-179.

연구들이 문제풀이 과정에만 관심을 가질 뿐, 질문 자체는 처음부터 주어진 것, 혹은 누구나 인식할 수 있는 것으로 상정하고 있다고 지적한다. 그러나 질문을 생성해 내는 과정의 중요성 또한 간과될 수 없다. 즉 무엇이 문제인가를 규명하고 그 문제를 체계화·구조화하며, 그것이 해결할 가치가 있는 문제인지, 현 단계에서 해결할 수 있는 문제인지를 평가함으로써 주어진 문제를 ‘풀 수 있는’ 질문으로 만들어내는 일은 문제해결에 앞서 선결되어야 할 뿐 아니라 창의성이 발휘되는 일이라고 할 수 있다.

루트번스타인은 만들어진 질문이 해결할 가치가 있는 좋은 문제인지 아닌지를 평가할 수 있는 기준으로, 문제의 유형(type)과 해결가능 정도(degree), 그리고 문제의 단계(order)를 제시했다. 그가 제시한 질문의 열 가지 유형은 다음과 같다.⁵⁾

- ① 정의에 관한 질문: “속도는 무엇인가“와 같은 공리에 관련된 문제
- ② 이론에 관한 질문: 규칙적인 패턴의 인식 혹은 발명
- ③ 데이터에 관한 질문: 경험이나 정보 수집
- ④ 테크닉에 관한 질문: 실험 도구 발명, 분석 기법, 표상(display) 기법 개발 등 새로운 현상을 관찰할 수 있게 혹은 만들어낼 수 있게 해 주는 테크닉
- ⑤ 평가에 관한 질문: 정의, 이론, 관찰, 방법 등이 특정 상황이나 특정 응용에 얼마나 적합한가를 평가하는 문제로, 통계학의 질문들이 대표적
- ⑥ 종합(integration)에 관한 질문: 두 개 이상의 이론이나 데이터 집합, 연구방법 등이 충돌하거나 모순적인 상황에서 이를 종합해야 하는 문제
- ⑦ 확장의 문제: 특정한 정의나 이론, 기법, 테크닉 등의 사용 범위를 기존에 적용되던 범위를 넘어선 영역에 적용해 보는 문제
- ⑧ 비교에 관한 문제: 가능한 해결책이 두 개 이상 존재할 경우, 어떤 것이 더 좋은 것인가를 평가
- ⑨ 적용에 관한 문제: 한 문제의 해결책을 다른 영역, 다른 문제로 확장시키는 경우
- ⑩ 인위적 문제: 오해에서 연유한 문제

5) Robert Root-Bernstein, "Problem Generation and Innovation," p. 175.

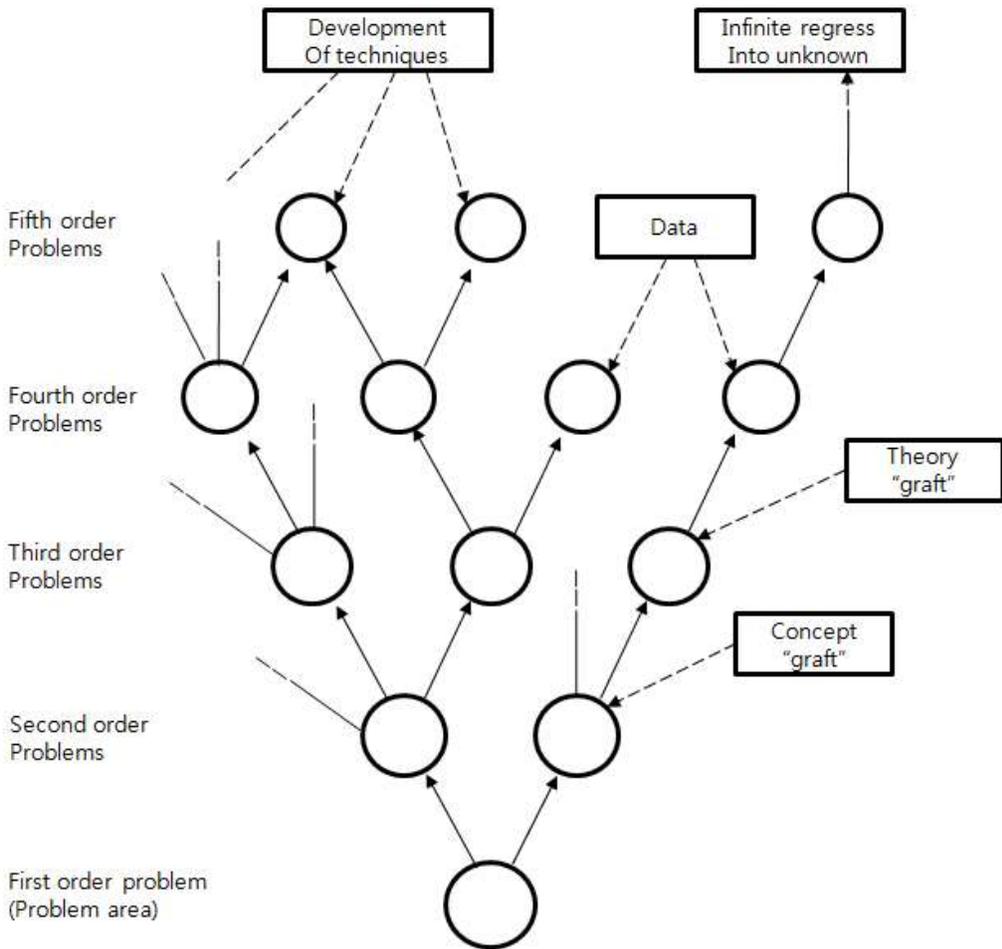


그림 1. 문제의 단계에 따른 분류 (출처: Robert Root-Bernstein, "Problem Generation and Innovation," in Larisa V. Shavinina (ed.) International Handbook on Innovation (Elsevier Science Ltd., 2003), p. 177.)

루트번스타인이 제안하는 해결가능 정도의 기준은 다음의 다섯 가지로 분류된다. 1)해결불가능 2)근사적(approximation)으로 해결가능 3)정확하게 해결가능 4)그런 종류의 문제 전반(as a class)에 대해서는 해결가능 5)특정 경우에 있어서만 해결가능.

문제의 단계는 특정 질문의 중요성을 다른 질문들과의 관계 속에서 판단할 때 적용되는 기준이다. 이는 질문들의 논리적 관계와 기법의 연계를 보여주는 위계 관계도[그림 1]를 통해 표현될 수 있다.

나. 문제 유형별 분류

코쉬랜드는 과학적 발견의 유형을 ‘Cha-Cha-Cha 이론’에 따라 세 가지로 분류했다.⁶⁾ 그것은 임무(charge), 도전(challenge), 우연(chance)의 범주로 각각의 특징은 다음과 같다.

임무는 조금만 주의를 기울이면 생각할 수 있는 이미 주어진 문제를 해결하는 과정에서 일어나는 창조적인 과학적 발견과 연관된다. 쿤의 언어로 말하자면 정상과학(normal science) 내에서의 과학 활동이라고 할 수도 있다. 정상과학의 단계에서는 과학자들이 풀어야 할 문제들이 이미 주어져 있고 과학자들은 이런 문제들을 하나씩 해결해 나가는 과정에서 새로운 과학적 발견을 하게 된다. 코쉬랜드에 따르면, 임무의 범주에 속하는 과학적 발견의 역사적 사례로는 뉴턴(Isaac Newton)의 만유인력 발견, 멘델(Gregor J. Mendel)의 유전법칙 발견 등이 있다.

도전은 문제 자체도 매우 창의적이며 해결과정도 기존 이론에 도전하는 새로운 과학적 발견과 연관된다. 기존의 이론으로는 잘 설명되지 않는 이상 현상이 발견되었을 때, 이를 설명할 수 있는 새로운 개념 혹은 이론을 고안하는 과정에서 일어나는데, 쿤(Thomas Kuhn)의 언어를 빌리자면 이상 현상의 축적으로 더 이상 기존의 패러다임이 유지되기 어려운 위기가 도래하고 이로 인해 새로운 패러다임이 형성되는 ‘위기’ 단계에서의 과학 활동이라고 볼 수 있다. 이러한 위기 상황에서는 과학자들이 이상 현상을 설명할 수 있는 새로운 이론이나 개념을 고안하게 되고 그 과정에서 새로운 과학적 발견이 일어난다. 코쉬랜드는 이러한 과학적 발견의 예로 케쿨레(August Kekule)의 벤젠구조 발견, 아인슈타인(Albert Einstein)의 특수 상대성 이론 발견, 보어(Niels Bohr)의 양자역학적 원자 발견 등을 들었다.

우연은 예상치 못한 기회에 이뤄진 우연한 과학적 발견을 의미하는데 문제의 해결보다 문제의 발견이 더 창의적인 경우를 말한다. 과학자들은 실험을

6) Daniel E. Koshland Jr., “The Cha-Cha-Cha Theory of Scientific Discovery,” *Science* 317 (2007) pp. 761-762.

하는 과정에서 종종 특이 현상을 발견하는데 대개의 경우 실험상 오류로 치부된다. 하지만 드물게 그것이 매우 중요한 발견으로 이어지는 경우가 있는데, 코쉬랜드는 이를 위해서는 ‘준비된 마음’이 필요하며 그것은 호기심과 배경지식에 의해 결정된다고 말한다. 잘 알려진 역사적 사례로는 플레밍(Alexander Fleming)의 페니실린 발견, 파스퇴르(Louis Pasteur)의 광학활성 발견 그리고 플런킷(Roy Plunkett)의 테플론 발견 등이 있다. 이를 [표1]과 같이 정리할 수 있다.

유형	특징	비고
임무	일반적 문제, 창의적 해결 주어진 문제 해결과 관련된 과학적 발견	정상과학 단계
도전	창의적 문제, 창의적 해결 기존의 이론으로 설명되지 않는 이상 현상 (abnormalities) 발견과 이를 설명할 수 있는 새로운 개념 혹은 이론 발견	패러다임 전환기
우연	창의적 문제, 일반적 해결 뜻밖의 기회에 이뤄진 우연한 발견	정상과학, 패러다임 전환기

표 1. Cha-Cha-Cha 이론에 따른 과학적 발견의 세 가지 유형

코쉬랜드는 Cha-Cha-Cha 이론으로부터 다음의 두 가지 함의를 이끌어냈다. 첫째, 과학적 탐구의 진행 단계에 따라 서로 다른 유형의 과학적 문제가 존재하며 그에 따라 문제해결 방식이 달라진다. 둘째, 주요한 과학적 발견은 그 발견이 완결되기까지 다수의 새로운 발견들이 축적되고 종합되어 완성된 것이며, 그러한 새로운 발견들은 서로 다른 유형의 과학적 문제를 해결하는 과정에서 나타난 것이다. 이는 다음과 같이 정리될 수 있다.

- 과학적 탐구는 서로 다른 유형의 문제를 해결하는 연속적인 과정임
- 각 단계에서 발생하는 문제들은 그 유형에 맞는 서로 다른 접근 방식을 요구함

이 두 가지 함의는 연구 주제 유형을 분류하는 데 한 가지 중요한 가능성을 제공해 준다. 풀어야 할 문제의 성격과 그것을 해결하기 위한 방법을 기준으로 연구 주제 유형을 분류한다면, 연구 주제 유형은 과학적 탐구의 진행 단계

에 따라 달라진다. 따라서 과학적 탐구의 진행 단계를 일반화할 수 있다면 그에 따른 연구 주제 유형도 일반화 할 수 있을 것이다.

다. 연구 주제 분류 방식

루트벤스타인과 코쉬랜드가 제안한 분류방식을 토대로, 우리는 노벨과학상 연구 주제를 분석하기 위해 연구 주제 유형을 다음의 세 단계로 분류했다. 1) 현상발견 2)특성연구 3)응용 및 확장.

연구 주제의 유형을 이렇게 분류한 이유는 앞서 코쉬랜드가 지적한 것처럼, “과학적 탐구는 서로 다른 유형의 문제를 해결하는 연속적인 과정으로 볼 수 있”으며, “각 단계에서 발생하는 문제들은 그 유형에 맞는 서로 다른 접근 방식을 요구”하기 때문이다. 루트벤스타인이 [그림 1]을 통해 제안한 문제 단계에 따른 유형 분류 역시 이와 유사한 인식에 바탕을 두고 있다고 볼 수 있다. 더욱이 노벨위원회의 관심을 받고 있는 특정 분야들에 수상이 집중되는 경향을 보이는 노벨과학상은 특정 분야의 발전 과정을 보여주는 뚜렷한 발자국이 되기도 한다. 따라서 현상발견, 특성연구, 응용 및 확장의 세 단계 유형 분류는 노벨과학상을 분석하는 데 적합하다고 할 수 있다.

이제 이 세 단계의 주제 유형이 각각 어떤 특징을 가지고 있는지를 루트벤스타인과 코쉬랜드의 분류 방식과 연관 지어 살펴보자. 우선, 우리는 앞에서 제시한 세 단계 유형을 루트벤스타인이 제안한 [그림 1]의 단계별 유형과 연결시킴으로써 하나의 과학적 주제를 그 중요성과 문제풀이 순서에 맞게 분류할 수 있다. 예를 들어, [그림 1]의 1차 문제(first order problem) 영역에 특정 현상의 발견에 관한 질문(그 현상에 관련된 데이터에 관한 질문)을, 2, 3, 4차 문제 영역에 특성 연구에 관련된 질문(그 현상에서 패턴을 잡아내는 이론에 관한 질문이나 현상의 정교화를 위한 테크닉에 관한 질문)을 대입시킬 경우, 문제의 단계에 따라 요구되는 질문의 유형과 이를 해결하는 데 적합한 문제풀이 방법들을 분류할 수 있다.

과학적 발견의 세 가지 유형에 관한 코쉬랜드의 제안 역시 현상발견, 특성연구, 응용 및 확장의 세 단계 유형 분류와 연결될 수 있다. 예컨대, 현상발견

은 주로 도전이나 우연과 연결되며, 특성연구는 임무와 연결되고, 응용 및 확장은 임무나 도전과 연결된다.

세 단계 유형, 즉 [현상발견 -> 특성연구 -> 응용 및 확장]의 흐름은 정상 과학 내에서 과학적 탐구의 자연스러운 발전과정으로 볼 수 있으며, 시간의 흐름과 대체로 일치하는 경향을 보인다. 또한 이 흐름은 기존의 패러다임을 위협하는 새로운 현상이 발견될 경우 처음부터 다시 반복될 수 있으며, 이런 새로운 현상은 특성연구나 응용 및 확장의 단계에서 발견될 수 있다. 과학적 탐구의 이러한 경향성은 노벨과학상 연구 주제를 분석한 다음절에서 확인해 볼 수 있을 것이다.

현상발견, 특성연구, 응용 및 확장의 세 단계 유형에 관한 지금까지의 설명은 다음의 [표 2]로 요약할 수 있다.

	단계	탐구 성격	특징 및 탐구방식
현상발견	문제설정	도전, 우연	<ul style="list-style-type: none"> - 우연히 새로운 현상 발견 - 기존의 이론에 맞지 않는 이상 현상 발견
특성연구	문제풀이	임무	<ul style="list-style-type: none"> - 현상을 설명할 수 있는 개념이나 이론을 고안 - 이론 내에서 해결되어야 할 문제들을 규정&풀이 - 데이터 수집 및 분류 - 분석을 위한 실험도구 개발
응용 및 확장	타 영역에 적용	임무, 도전	<ul style="list-style-type: none"> - 실용적인 목적을 위한 기술 개발 - 이론이나 개념을 다른 분야에 적용

표 2. 노벨과학상 분석을 위한 주제 유형 분류

2. 노벨과학상을 중심으로 한 유망 주제 조사

가. 우수 연구 주제의 지표: 징후적 지시자

그동안 노벨과학상을 탔던 연구자들을 분석한 연구에 따르면 노벨과학상 수상자들은 몇 가지 점에서 공통의 특징을 보인다. 첫째, 노벨과학상 수상자의 연구는 매우 높은 피인용률을 보이며, 그것도 꽤 장기간에 걸쳐 인용된다. 둘째, 노벨과학상 수상자들은 노벨상을 타기 전에 이미 과학계의 권위 있는 상을 수상하는 경우가 많다. 다시 말하면 노벨과학상은 이미 다른 권위 있는 상들을 통해 입증된 연구자의 성과를 최종적으로 승인해 주는 것과 같은 역할을 한다는 것이다. 이런 공통점에 착안해서 일부에서는 노벨과학상을 미리 예측하려는 시도들이 있었다. 노벨상 수상의 징후를 보여주는 ‘징후적 지시자’를 통해 노벨상의 수상 가능성을 점쳐 보는 것이다.⁷⁾ 대표적인 징후적 지시자로는 울프상(물리, 화학, 의학), 래스커의학연구상(기초의학, 임상의학, 특별상), 톰슨-로이터사의 인용 지수 분석(노벨상 후보자 발표), 노벨 심포지엄을 들 수 있다.

(1) 울프상⁸⁾과 래스커상⁹⁾

울프상(Wolf Prize)은 독일 태생의 발명가 리카르도 울프(Ricardo Wolf)가 세운 이스라엘의 울프 재단이 농업, 화학, 수학, 의학, 물리학, 예술 등 6개 분야에 수여하는 상이다. 1978년 첫 수상자를 선정했으며, 매년 수상자를 선정하는 것을 원칙으로 삼지만 적절한 수상자가 없을 경우에는 수상자를 배출하지 않기도 한다. 과학 분야, 특히 물리학과 화학 분야에서는 노벨상 다음으로 권위 있

7) 징후적 지시자에 대한 분석은 다음을 참조하라. 임경순 등, 『노벨과학상 분석 및 접근전략 연구』.

8) 울프상에 대해서는 울프재단 홈페이지를 참조하라. <http://www.wolffund.org.il/main.asp>

9) 래스커상에 대해서는 다음의 페이지를 참조하라. <http://www.laskerfoundation.org/awards/index.htm>

는 상으로 인정받고 있고, 이 상을 받은 사람이 후에 노벨상을 타는 경우가 많아 울프상 수상자들은 노벨상 유력 후보로 거론되곤 한다. 울프상 수상자중 거의 30%가 노벨상 수상자가 되었고 평균적으로 울프상을 수상한 후 5년 후에 노벨상을 수상하였다[울프상 수상자는 부록 2 참고].

래스커상의 정식명칭은 Lasker Medical Research Award로서 1946년부터 지금까지 매해 의학 분야의 연구에 공헌하거나 공중 보건에 기여한 사람에게 수여하는 상으로, 생리학 분야에서는 울프상보다 더 큰 권위를 인정받고 있다. 기초의학, 임상의학, 특별상의 3부문으로 나뉘어져 있는데 이 상 또한 미래의 노벨 수상자를 예측해 볼 수 있는 상으로 여겨지고 있다. 특히 기초의학부문의 수상자 중에 50%정도가 노벨 생리학상(간혹 화학상)을 수상하였기에 매우 중요한 노벨상의 징후적 지시자이다. 래스커상 수상자는 평균적으로 5년 후에 노벨상을 수상하였다[래스커상 수상자는 부록 2 참고].

구분	Wolf Prize				Lasker Medical Research Award				전체
	화학	물리학	의학	소계	기초의학	임상의학	특별상	소계	
전체 수상자(명)	39	48	45	132	142	134	11	287	419
노벨상 수상자(명)	10	14	15	39	69	10	1	80	119
노벨상 수상비율	25.6%	29.2%	33.3%	29.5%	48.6%	7.5%	0.9%	27.9%	28.4%
평균 수상격차	4년	6.1년	4.7년	4.9년	4.5년	8.2년	2년	4.9년	4.9년

표 3. 울프상과 래스커상 수상자의 노벨과학상 수상 비율 (울프상과 노벨과학상 수상 격차: 화학상은 3년 이하가 4명(당해년도 3명), 물리학상은 2년 이하가 8명, 의학상은 1명을 제외한 14명이 6년 이내 노벨상을 수상. 래스커상과 노벨과학상 수상격차: 기초과학분야 39명이 수상 3년 내 노벨상 수상(당해 연도 노벨상 수상은 12명), 임상의학 분야는 3년 이하가 4명) (차두원, “노벨과학상 수상현황 및 우리 과학계의 과제”, 2011, 발표자료중 재인용)

(2) 톰슨-로이터 인용상(Thomson Reuters Citation Laureate)¹⁰⁾

세계 최고의 인용 데이터베이스인 Web of Science를 운영하는 톰슨-로이터사는 자사의 데이터베이스를 분석하여 해마다 논문인용을 주요한 요소로 하여 노벨상 수상 예상자를 발표하고 있다. 여기에 지명된 학자들이 그 해에는 아니더라도 후에 노벨상을 수상하는 경우가 자주 있다. 인용상 수상자의 선정 기준은 다음과 같다.

- 과거 20년 넘는 동안 저술한 논문의 총 인용빈도가 상위 0.1% 이내
- 영향력 큰 논문(high-impact reports)의 개수
- 분야에 영향을 미친 기간

연구의 인용 정도와 동료 연구자들로부터의 존경 사이에는 강한 상관관계가 있다는 연구결과가 있고, 이런 동료들의 존경은 곧 노벨상 후보 추천에 영향을 미칠 수 있다는 점에서 인용상 수상자들은 노벨상 후보 순위의 꽤 상위를 차지한다고 할 수 있다. 또 하나 분명한 점은 톰슨-로이터사에서 발표하는 후보 과학자들의 연구는 그 무렵의 최신 연구 주제를 반영하고 있다는 점이다.

(3) 노벨 심포지엄¹¹⁾

노벨 재단의 주최로 열리는 노벨 심포지엄 또한 노벨 위원회가 주목하는 연구 주제들이 무엇인지를 파악할 수 있는 자리로, 노벨상의 징후적 지시자의 하나라고 할 수 있다. 노벨 심포지엄은 노벨상이 수상되는 6개 분야에서 이루어지고 있는 혁신적인 연구나 문화적, 사회적으로 의미 있는 주제들을 심도 깊게 다루기 위한 목적으로, 1965년부터 시작된 프로그램이다. 2011년까지 총 150회의 Nobel Symposia(NS)와 1991년도와 2001년도에 각 6개 부문에 Nobel

10) 톰슨-로이터 인용상은 다음을 참조하라. <http://ip-science.thomsonreuters.com/nobel/>

11) 노벨심포지엄에 관한 정보는 노벨상 홈페이지를 참조하라. http://www.nobelprize.org/nobel_organizations/nobelfoundation/symposia/

Jubilee Simposia(NJS)와 Nobel Centennial Symposia(NCS)의 심포지엄이 개최되었다.

자연과학 분야의 노벨 심포지엄은 특정 주제를 선정된 후 그 분야의 20-40명 내외의 리더 과학자들을 초청하여 보통 3-5일에 걸쳐 열린다. 초청된 과학자들은 몇 개의 세션으로 나누어 그 분야의 연구 동향, 현재 진행 중인 연구, 해결해야 할 문제, 앞으로의 전망 등에 대해 발표를 하고 토론을 나눈다. 리더 과학자들 외에, 심포지엄이 열리는 지역의 과학자들과 대학원생들 수십 명은 여기에 참석할 수 있는 행운을 누리게 된다.

이 심포지엄은 정기적인 모임이 아니다. 때로는 한 분야에서 한 해에 2-3개의 주제에 대해 각각 심포지엄이 열리기도 하고, 때로는 한 분야에서 몇 해 동안 심포지엄이 개최되지 않기도 한다.

1990년 이후 자연과학 분야에서는 물리학 분야에서 20회, 화학 분야에서 11회, 생리학 분야에서 27회가 개최되었다(각 2회는 세 분야 공동 개최). 2000년 이후를 보면 생리학 분야에서 16회, 물리학 분야에서 12회, 화학 분야에서 7회 개최로(각 2회는 세 분야의 중복), 생리학 분야의 심포지엄이 가장 많이 개최되었다.

2000년대 이후의 주목할 만한 변화로는 물리, 화학, 생리학 세 분야의 학제간 연구를 강조하는 점을 들 수 있다. 2005년에는 에너지를 주제로 우주, 분자, 생명의 차원에서 이 문제에 접근하며 분과를 뛰어넘는 교류를 도모했으며(NS 132), 2011년에는 3M이라는 표제 하에 기계(Machine), 분자(Molecule), 정신(Mind)에 관한 학제간 상호작용을 도모했다(NS 149). 이런 연합 심포지엄 외에도, 한 분야에 국한된 심포지엄에서 학제간 주제를 다루는 경우가 많아지고 있다. 예를 들어, 2006년 물리학 분과에서 개최된 “우주의 화학, 분자 천체물리학”(NS 133)은 그 제목부터 화학과 물리학의 쌍들을 서로 바꾸어 연결시키고 있다. 이 심포지엄은 물리학 분야에 속했지만, 실상 그 안에서는 물리학과 화학 양 분야 공통의 관심사이자, 두 분야의 협력적 연구를 통해 해결될 수 있는 문제들을 다루었다.

물리, 화학, 생리학 분야에서 1990년대 이후에 열린 노벨 심포지엄을 정리하면 다음과 같다.

물리학 분야

개최 연도	심포지엄 번호	주 제
1990	NS 79	The Birth and Early Evolution of Our Universe
1991	NJS* 91-1	Low Dimensional Properties of Solids
1992	NS 85	Heavy Ion Spectroscopy and QED Effects in Atomic Systems
1994	NS 91	Particle Traps and Related Fundamental Physics
1995	NS 98	Barred Galaxies and Circumnuclear Activity
1996	NS 99	Heterostructures in Semiconductors
1997	NS 104	Modern Studies of Basic Quantum Concepts and Phenomena
1998	NS 109	Particle Physics and the Universe
2000	NS 116	Quantum Chaos
2000	NS 117	The Physics and Chemistry of Clusters
2001	NCS** 2001-1	Condensation and Coherence in Condensed Systems
2003	NS 127	String Theory and Cosmology
2004	NS 129	Neutrino Physics
2005	NS 131	Controlled Nanoscale Motions in Biological and Artificial Systems
2005	NS 132	Alfred Nobel Symposium: Energy in Cosmos, Molecules and Life
2006	NS 133	Cosmic Chemistry and Molecular Astrophysics
2007	NS 135	Physics of Planetary Systems
2009	NS 141	Qubits for Future Quantum Information
2010	NS 148	Physics of Graphene
2011	NS 149	3M: Machines, Molecules and Mind

표 4. 물리학 분야 노벨 심포지엄 (*:Nobel Jubilee Symposia **:Nobel Centennial Symposium)

화학 분야

개최 연도	심포지엄 번호	주 제
1991	NS 81	Conjugated Polymers and Related Materials
1992	NS 84	Early Life on Earth
1991	NJS* 91-2	CO ₂ -fixation and CO ₂ -reduction in Biological and Model Systems
1995	NS 97	Catalytic Asymmetric Synthesis
1996	NS 101	Femtochemistry and Femtobiology: Ultrafast Reaction Dynamics at Atomic Scale Resolution
2001	NCS** 2001-2	Frontiers of Molecular Science
2003	NS 126	Membrane Proteins: Structure Functions and Assembly
2004	NS 130	Molecular Mechanisms in Biological Systems
2005	NS 132	Alfred Nobel Symposium: Energy in Cosmos, Molecules and Life
2008	NS 138	Single Molecule Spectroscopy in Chemistry, Physics and Biology
2011	NS 149	3M: Machines, Molecules and Mind

표 5. 화학 분야 노벨 심포지엄 (*:Nobel Jubilee Symposia **:Nobel Centennial Symposium)

생리학 분야

개최 연도	심포지엄 번호	주 제
1990	NS 80	Etiology of Human Disease at the DNA Level
1992	NS 83	Biological Function of the Gangliosides
1993	NS 86	Toward a Molecular Basis of Alcohol Use and Abuse
1994	NS 89	Individual Development in a Lifespan Perspective
1994	NS 90	Mitochondrial Diseases
1991	NJS* 91-3	Control of Embryonic Development

1996	NS 94	The Nature - Nurture Controversy
1996	NS 100	Functional Organization of the Eukaryotic Cell Nucleus
1997	NS 103	Towards an Understanding of Integrative Brain Functions. Analyses at Multiple Levels
1998	NS 106	Intracellular and Persistent Infections
1998	NS 111	Schizophrenia: Pathophysiological Mechanisms
1999	NS 113	Estrogens and Women's Health - Benefit or Threat?
2000	NS 114	Prevention and Treatment of Tuberculosis in the Coming Century
2001	NS 119	Global HIV Therapeutics - HIV Vaccines
2001	NCS** 2001-3	Beyond Genes
2003	NS 121	Self-Organization
2003	NS 124	Septicemia and Shock: Pathogenesis and Novel Therapeutic Strategies
2004	NS 128	Epigenetic Reprogramming in Development and Disease
2005	NS 132	Alfred Nobel Symposium: Energy in Cosmos, Molecules and Life
2006	NS 134	The Adipocyte: A Multifunctional Cell
2008	NS 137	Genes, Brain and Behavior
2009	NS 140	Acute Infections Caused by Gram-positive Bacteria
2010	NS 143	Genetics in Medicine
2010	NS 144	The Cell Cycle and Apoptosis in Disease
2010	NS 145	Understanding the Uniqueness of the Human Mind: Neuro-Science of Complex Cognition
2009	NS 146	Systems Biology
2011	NS 149	3M: Machines, Molecules and Mind

표 6. 생리학 분야 노벨 심포지엄 (*:Nobel Jubilee Symposia **:Nobel Centennial Symposium)

노벨 심포지엄의 주제는 그 후 수상으로 연결되고 특히 심포지엄에 참가한 학자 중에 그 후 노벨상을 수상하는 경우는 매우 흔하게 나타난다. 화학상 부문에서 1999년도에서 2011까지 수상자와 노벨 심포지엄 참석의 관계를 보면 다음과 같다.

노벨상 수상연도	이름	노벨심포지엄 주제 (개최연도-심포지엄 번호)
1999년	Ahmed Zewail	“Femtochemistry and Femtobiology: Ultrafast Reaction Dynamics at Atomic-Scale Resolution”(96-101)
2000년	Alan Heeger Alan MacDiarmid Hideki Shirakawa	“Conjugated polymers and related materials”(91-81)
2001년	Berry Sharpless	“Catalytic Asymmetric Synthesis”(95-97) “Frontier of Molecular Science” (NCS01-2)
2001년	Ryoji Noyori	“Catalytic Asymmetric Synthesis” 95-97)
2002년	Kurt Wuthrich	“Frontier of Molecular Science” NCS01-2)
2003년	Roderick Mackinnon	“Membrane Protein: Structure, Function and Assembly” (03-126)
2006년	Roger Konberg	“Frontier of Molecular Science”(NCS01-2) “Molecular Mechanism in Biological System”(05-130)
2007년	Gerhard Ertl	“Frontier of Molecular Science”(NCS01-2) “Energy in Cosmos, Molecules and Life”(05-132)
2008년	Roger Tsien	“Molecular Mechanism in Biological System”(05-130)
2009년	Thomas Steitz	“Frontier of Molecular Science”(NCS01-2) “Molecular Mechanism in Biological System” 05-130
2009년	Venkatraman Ramakrishnan Ada Yonath	“Molecular Mechanism in Biological System”(05-130)

1999-2011년 사이의 수상자들에서 보는 바와 같이 04, 05, 10, 11년 수상자를 제외한 13번 중 9번의 수상이 이미 이전 화학분야 노벨 심포지엄에 참석하였던 학자들이다. 노벨상 수상을 심포지엄에 참석한 직후부터 10년 사이에 수상하고 있다. 특히 수상자를 많이 배출한 심포지엄이 있는데 2001년에 개최된

Nobel Centennial Symposia에서는 “Frontiers of Molecular Science”라는 제목으로 화학 전반에 걸쳐 논의가 이루어졌다. 이 자리에는 이미 노벨상을 수상한 학자 4명이 참여하였고, 또 여기에 참석하여 발표한 학자 중 5명이 심포지엄 이후에 수상자로 선정되었다.

그리고 노벨 심포지엄에 참석하지 않은 학자의 경우도 04, 11년도는 징후적 지시자인 래스커 기초의학상과 울프 물리학상을 이미 수상한 학자이다. 그리고 05, 10년 수상자는 유기화학분야인데 이미 유기화학분야에서 명성을 가진 상의 수상자였다. 따라서 노벨상 수상자들은 거의 수상 이전에 학계에서 널리 인정 받는 학자로서 저명한 상을 수상한 학자들이다. 2000년 이후 수상자들 중에 일본의 연구 장비 회사 연구원이었던 고이치 다나까(Koichi Tanaka) 정도만이 유일한 예외일 것이다. 그리고 노벨 물리학상과 생리학상에서도 유사한 경향을 보이고 있다.

징후적 지시자의 노벨상 예측력은 2000년 이후 노벨과학상 수상자들과 징후적 지시자의 관계를 보여준 다음의 표에서 확인할 수 있다.

물리 분야

수상 연도	노벨상 수상자	징후적 지시자
2000	Zhores I. Alferov	노벨심포지엄(1996)
	Herbert Kroemer	노벨심포지엄(1996)
	Jack S. Kilby	
2001	Eric A. Cornell	노벨심포지엄(2001)
	Wolfgang Ketterle	노벨심포지엄(2001)
	Carl E. Wieman	노벨심포지엄(2001)
2002	Raymond Davis Jr.	울프상(2000)
	Masatoshi Koshihira	울프상(2002)
	Riccardo Giacconi	울프상(1987)
2003	Alexei A. Abrikosov	
	Vitaly L. Ginzburg	울프상(1994/5)
	Anthony J. Leggett	울프상(2002/3), 노벨심포지엄(2001)

2004	David J. Gross	툼슨로이터(1990), 노벨심포지엄(1990)
	H. David Politzer	
	Frank Wilczek	툼슨로이터(1990), 노벨심포지엄(1990)
2005	Roy J. Glauber	
	John L. Hall	
	Theodor W. Hänsch	
2006	John C. Mather	
	George F. Smoot	
2007	Albert Fert	울프상(2006/7), 톼슨로이터(2006)
	Peter Grünberg	울프상(2006/7), 톼슨로이터(2006)
2008	Makoto Kobayashi	
	Toshihide Maskawa	
	Yoichiro Nambu	울프상 (1994/5)
2009	Charles Kuen Kao	
	Willard S. Boyle	
	George E. Smith	
2010	Andre Geim	툼슨로이터(2008)
	Konstantin Novoselov	툼슨로이터(2008), 노벨심포지엄(2010)
2011	Saul Perlmutter	툼슨로이터(2010), 노벨심포지엄(2003)
	Brian P. Schmidt	툼슨로이터(2010)
	Adam G. Riess	툼슨로이터(2010)

표 7. 2000년 이후 노벨 물리학상을 예측한 징후적 지시자

화학 분야

수상 연도	수상자	징후적 지시자
2000	Alan J. Heeger	툼슨로이터(1990), 노벨심포지엄(1991)
	Alan G. MacDiarmid	노벨심포지엄(1991)
	Hideki Shirakawa	노벨심포지엄(1991)
2001	William S. Knowles	
	Noyori Ryoji	울프상(2001), 톼슨로이터(1997), 노벨심포지엄(1995)
	K. Barry Sharpless	울프상(2001), 톼슨로이터(1997), 노벨심포지엄(1995)

2002	Kurt Wüthrich	노벨심포지엄(2001)
	John B. Fenn	
	Koichi Tanaka	
2003	Peter Agre	
	Roderick MacKinnon	래스커(1999 기초의학), 노벨심포지엄(2003)
2004	Irwin A. Rose	
	Avram Hershko	울프상(2001 의학), 래스커(2000 기초의학)
	Aaron Ciechanover	래스커(2000 기초의학)
2005	Yves Chauvin	
	Robert H. Grubbs	툼슨로이터(2003)
	Richard R. Schrock	툼슨로이터(1997)
2006	Roger D. Kornberg	노벨심포지엄(2001, 2005, 2006 생물)
2007	Gerhard Ertl	울프상(1998), 노벨심포지엄(2005)
2008	Martin Chalfie	
	Roger Tsien	울프상(2004 의학), 톼슨로이터(2008), 노벨심포지엄(2001 생물, 2005)
	Osamu Shimomura	
2009	Venkatraman Ramakrishnan	노벨심포지엄(2005)
	Thomas A. Steitz	노벨심포지엄(2001, 2005)
	Ada E. Yonath	울프상(2006), 노벨심포지엄(2005)
2010	Richard F. Heck	
	Akira Suzuki	노벨심포지엄(2004 물리)
	Ei-ichi Negishi	
2011	Dan Shechtman	울프상(1998 물리), 톼슨로이터(2008)

표 8. 2000년 이후 노벨 화학상을 예측한 정후적 지시자

생리학 분야

수상 연도	노벨상 수상자	정후적 지시자
2000	Arvid Carlsson	노벨심포지엄(1998)
	Paul Greengard	노벨심포지엄(1997, 1998)
	Eric Kandel	울프상(1999), 래스커(1983, 기초의학) 노벨심포지엄(1997, 2001 / 2005 물리), 톼슨로이터(1989)

2001	Leland H. Hartwell	래스커(1998 기초의학)
	Tim Hunt	
	Paul Nurse	래스커(1998 기초의학)
2002	Sydney Brenner	툼슨로이터(1989)
	H. Robert Horvitz	노벨심포지엄(2001)
	John Sulston	
2003	Paul Lauterbur	
	Peter Mansfield	
2004	Richard Axel	노벨심포지엄(1995 물리)
	Linda B. Buck	노벨심포지엄(2001)
2005	Barry Marshall	
	Robin Warren	
2006	Andrew Fire	
	Craig Mello	
2007	Mario Capecchi	울프상(2002), 래스커(2001 기초의학), 노벨심포지엄(1990), 톼슨로이터(2006)
	Martin Evans	래스커(2001 기초의학), 톼슨로이터(2006)
	Oliver Smithies	울프상(2002), 래스커(2001 기초의학), 노벨심포지엄(1990), 톼슨로이터(2006)
2008	Harald zur Hausen	
	Françoise Barré-Sinoussi	
	Luc Montagnier	툼슨로이터(1989)
2009	Elizabeth Blackburn	래스커(2006 기초의학), 톼슨로이터(2009)
	Carol W. Greider	래스커(2006 기초의학)
	Jack W. Szostak	래스커(2006 기초의학), 톼슨로이터(2009)
2010	Robert G. Edwards	
2011	Bruce Beutler	노벨심포지엄(2003), 톼슨로이터(2008)
	Jules A. Hoffmann	툼슨로이터(2008)
	Ralph M. Steinman	툼슨로이터(2010)

표 9. 2000년 이후 노벨 생리의학상을 예측한 징후적 지시자

나. 노벨 물리학상을 중심으로 본 우수 주제

노벨 물리학상은 노벨과학상의 일반적인 이미지를 형성하는 데 가장 크게 기여 한 노벨과학상의 대표 분야이다. 세간의 이목을 끌었던 빌헬름 뢰트겐(Wilhelm Röntgen)의 X선 발견에 첫 노벨 물리학상이 수여됐을 때부터 노벨 물리학상은 물리학계의 가장 가치 있는 발견에 수여되었다. 그런 선구안 위에서 노벨 물리학상은 그 권위를 쌓아나가, 오늘날에는 물리학의 가장 중요한 주제가 무엇인지를 나타내는 표지자로서의 권위를 인정받고 있다. 따라서 지금까지의 노벨 물리학상 수상 연구들의 주제에서 나타나는 특징과 최근에 조명 받고 있는 주제들을 분석해 보면 유망 연구 주제들에 대한 시사점을 얻을 수 있을 것이다. 노벨 물리학상 연구 주제들에 대한 본격적인 분석에 앞서, 노벨 물리학상에 대한 이해를 돕기 위해 이 상의 일반적인 특징을 먼저 살펴보자.

(1) 노벨 물리학상의 일반적 특징

노벨 물리학상은 연구자가 아니라 업적, 즉 발견이나 발명에 대해 주어지는 상이다. 그런 이유 때문에 세계적인 명성을 얻은 물리학자 중에서도 특정한 발견 혹은 발명으로 그 연구가 대표되지 못하는 학자는 수상의 기회를 얻지 못하는 경우가 있고(대표적인 예로 아놀드 쑤머펠트(Arnold Sommerfeld)를 들 수 있다), 반대로 전체적인 연구 업적은 그다지 찬란하지 않음에도 운 좋게 뛰어난 발견이나 발명에 기여를 하게 되어 수상의 기회를 얻는 사람들도 있다.

노벨 물리학상이 일생의 연구 성과에 대한 종합평가의 성격이 아니라 특정 연구에 대한 평가의 성격을 띠고 있기 때문에 어떤 분야에, 어떤 주제에 이 상이 주어졌는지를 보고 그 변화의 양상을 분석해 보는 것은 20세기 물리학 분야의 발전상을 보는 데 도움이 될 뿐 아니라, 앞으로 발전 가능성이 높은 주제들에 대한 시사점을 얻는 데 있어서도 큰 도움이 될 것이다.

우선 노벨 물리학상의 주제들에 대한 시기별, 분야별 분석부터 시작해 보자.

시기별, 분야별로 볼 때, 노벨 물리학상의 연구 주제들은 크게 네 세대로 나누어 구분할 수 있다.¹²⁾ 첫 번째 세대는 1901-1925년 무렵에 주로 영향력을 발휘한 세대로, X선, 전자, 방사능, 양자론의 기본 아이디어 등 원자 내부의 구조와 특성에 대한 탐구에 관련된 주제들을 연구했다. 제 1회 뢰트겐부터 시작하여 1903년 방사능을 발견한 퀴리 부부(Marie and Pierre Curie)와 베크렐(Antoine Henri Becquerel), 전자를 발견한 조셉 존 톰슨(Joseph John Thomson), 1908년 노벨 화학상 수상자이지만 분명 이 전통에 속해 있는 러더퍼드(Ernest Rutherford), 양자론의 초석을 놓은 보어, X선 회절을 연구한 폰 라우에(Max Theodore Felix von Laue)와 브래그 부자(William and Lawrence Bragg) 등이 이 주제를 연구하여 20세기 1 사분기에 노벨상을 수상한 사람들이다.

두 번째 세대는 20세기 2사분기(1925~2차 세계대전)에 본격적으로 꽃을 피운 연구자들로, 양자물리학과 핵물리학에 집중했다. 배타원리를 발견한 볼프강 파울리(Wolfgang Ernst Pauli), 양자역학을 기초한 하이젠베르크(Werner Karl Heisenberg)와 슈뢰딩거(Erwin Schrödinger), 디랙(Paul Adrian Maurice Dirac) 등이 이 세대에 속했다. 또한 페르미는 원자 내부 깊숙이 들어가, 핵의 내부를 탐색하는 방법을 찾아내어 핵물리학의 시대를 열었다.

세 번째 세대와 네 번째 세대는 1940년대 시작하여 지금까지 이어지고 있다. 1947년부터 시작이 된 세 번째 세대는 양자전기동역학(QED) 분야를 형성한 연구자들로, 파인만(Richard P. Feynman), 겔만(Murray Gell-Mann), 와인버그(Steven Weinberg), 살람(Abdus Salam), 레더만(Leon Max Lederman) 등이 여기에 속한다. 이들의 연구 주제는 기본입자(쿼크)와 원자내부에 작용하는 힘(강력, 약력, 전자기력)에 대한 연구로 집중되었고, 거대한 가속기를 비롯한 최첨단의 거대과학이 이들의 연구를 가속시켰다.

네 번째 세대는 1940년 이후 시작한 세대로, 주로 양자론을 이용하여 물질의 구조 및 상태(액체, 고체, 기체)와 그 변화에 관한 연구를 수행했다. 관련된 여러 분야 중 초전도체, 초유체에서 특히 괄목할만한 연구 성과가 나왔고 이 연구들은 오늘날에까지 계속해서 이어지고 있다. 이 밖에도 터널링 효과, 양자

12) 버튼 펠드먼, 전제아 역, 『노벨상의 교양을 읽는다』 (한국경제신문, 2008), 257-357쪽.

홀 효과, 액정 등에 응집 물리 분야에서 이루어진 연구가 노벨상을 수상했다.

노벨 물리학상 연구 주제들을 분야별 분류에 초점을 맞춰 분포 패턴을 보는 것도 물리학의 주제 변화를 잘 보여준다(그림 2).¹³⁾ 물리학의 분야를 분류하는 방식은 매우 다양할 수 있지만, 여기서는 미국 물리협회(American Institute of Physics)가 국제 과학기술정보위원회(International Council on Scientific and Technical Information)와 함께 준비한 물리 천문학 분류 방식(PACS, Physics and Astronomy Classification Scheme)을 따랐다.¹⁴⁾ 이 분류 방식은 세부적인 주제 양상을 보여주는 데는 한계가 있지만, 물리학의 중심 분야의 변화에 대한 전반적인 양상을 보여주는 데는 효과적이다.

PACS의 분류 방식을 따라 1901~2000년까지 분야별로 노벨 물리학상을 분류한 연구를 보면, 현재까지 가장 많은 노벨 물리학상이 배출된 분야는 기본 입자와 장에 관한 연구를 하는 기본 입자 물리학 분야로 현재까지 총 23회에 걸쳐 노벨 수상자를 배출했다. 1900~2000년까지 전체 노벨상의 18.9%가 이 분야에서 배출되었고, 2000년 이후에도 2차례 (2004년, 2008년)의 노벨상이 더 배출되었다.

그 뒤를 잇는 것은 핵물리학 분야로 총 18회 수상이 나와, 기본 입자 물리학과 함께 노벨 물리학상의 2대 핵심 주제 리스트를 구성한다. 하지만, 수상이 이루어진 시기까지 고려하면 핵물리학 분야의 중요성은 상대적으로 낮아지게 된다. 기본 입자 분야의 노벨상이 20세기 후반에 수상이 집중된 반면, 핵물리학 분야는 1930년대 말~1960년대 초에 집중되어 있기 때문이다. 노벨 물리학상으로만 평가해 본다면, 핵물리학 분야는 한때 잘 나갔지만 현재는 그 중요성이 현저히 낮아진 분야라고 할 수 있다.

세 번째로 많은 수상작을 낸 분야는 일반 분야(15.8%)로, 양자역학 및 양자론과 관련된 6개의 노벨상 수상 연구가 이 분야에 포함된다. 이 연구들은 주로 1918년~1933년에 노벨상을 수상했는데, 비슷한 시기에 이와 밀접한 관련이

13) 노벨 물리학상에 대한 구체적인 분석은 다음을 참조하라. Romualdas Karazija and Alina Momkauskait, "The Nobel Prize in Physics: Regularities and Tendencies," *Scientometrics* 61:2 (2004), pp. 191-205.

14) "PACS, Physics and Astronomy Classification Scheme" http://www.aip.org/pacs/pacs2010/individuals/pacs2010_regular_edition/index.html (2012. 1. 15. 접속)

있는 연구들이 원자물리학 및 분자물리학에서 13개의 노벨상을 수상하였다.

응집 물리 분야는 그 분야의 경계가 넓고 약간은 모호한 분야라고 할 수 있다. 이런 광범위함 덕분에, 이 분야에 포함될 수 있는 모든 노벨상들을 합치면 기본 입자 분야보다도 그 수가 더 많다. 하지만 이 분야를 보다 고전적인 주제인 응집 물질의 구조적, 역학적, 열역학적 특성을 연구하는 분야(그림 2의 Con 1)와 전자적 구조 및 전기, 자기, 광학적 특성을 연구하는 분야(그림 2의 Con 2)로 나누면, 노벨 물리학상 첫 100년 동안 각각 9개와 14.5개의 노벨상을 배출했다. 이 중 후자에 속하는 노벨상이 1970년대 이후에 집중되어 있어서, 전자보다는 후자의 주제가 더 유망하다고 짐작할 수 있다.

20세기 노벨상의 6.3%를 차지한 고전물리학 분야는 그 명칭 때문에 그 분야의 연구의 장래성이 그다지 밝을 것 같지 않다는 선입견을 갖기 쉽지만, 실상 노벨상을 탄 세부 주제들을 보면 그 생각이 오래 유지되기는 힘들다. 이 분야에서 노벨상을 탄 연구의 대부분은 레이저 개발 및 응용에 관한 연구로 레이저를 응용한 연구들은 원자 냉각 기술, 이를 생물학에 응용한 연구 등 그 응용 분야를 점차 넓혀가고 있는 추세라서 물리학 분야 뿐 아니라 다른 분야에서도 추가적인 노벨상을 기대할 수 있을 것으로 보인다.

천문학 및 천체물리학은 20세기에 6.3%의 노벨 물리학상을 배출하여, 그 명성에 비해 적은 노벨상 수상 연구를 배출한 것으로 보인다. 그러나 상대론의 입증과 관련하여 이 분야에서는 추가적인 노벨상 수상이 있을 것으로 기대된다. 이 밖에 수리물리학이나 통계물리학도 노벨 물리학상에서 상대적으로 간과된 분야라고 할 수 있다. 이처럼 이 분야들이 간과된 이유 중 하나는 노벨상 선정 위원회에 이 분야를 대표해 줄만한 연구자들이 포함되지 않았기 때문일 수도 있다. 노벨 위원회에 관심을 갖게 된다면 언제든지 이 분야들에서 노벨상이 나올 확률은 매우 높다.

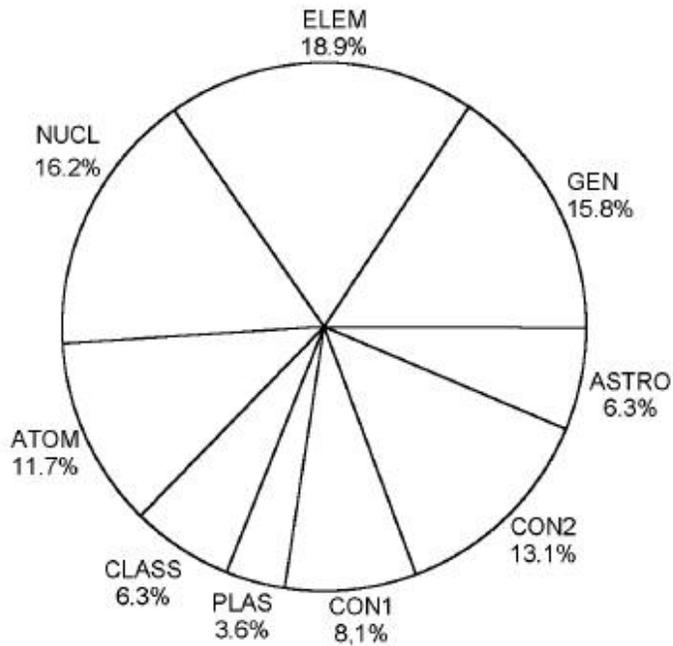


그림 2. 20세기 노벨 물리학상의 분야별 분류. Elem: 기본입자와 장에 관한 물리학, NUCL: 핵물리학, ATOM: 원자 및 분자 물리학, CLASS: 전자기학, 광학, 음향학, 열전달, 고전역학, 유체동역학, PLAS: 기체, 플라즈마, 전기방전에 관한 물리학, CON 1: 응집물질의 구조적 특성, 역학적이고 열역학적 특성, CON 2: 응집물질의 전자적 구조, 전기, 자기, 광학적 특성, ASTRO: 지구물리학, 천문학, 천체물리학. (출처: Karazija and Momkauskait, "The Nobel Prize in Physics," *Scientometrics* 61:2 (2004), p. 196.)

노벨 물리학상이 이론보다 실험을 선호한다는 점은 잘 알려져 있다. 통계 분석 또한 이를 확인해 주는데, 20세기 노벨 물리학상 중 실험물리학이 104회 수상을 한 반면, 이론물리학은 그 절반에도 못 미치는 49회의 수상을 기록했다(양쪽 모두에 속하는 경우는 9회). 실험물리학 대 이론물리학이 2:1의 비율을 보이는 셈이다. 하지만 이런 비율, 혹은 실험 물리학의 선호가 항상 나타나는 패턴이라고는 하기는 어렵다. 1910~1920년, 1960~1980년 사이에는 평균에 못 미치는 비율이 나타났고, 특히 1960~1980년 사이에는 오히려 이론적 연구들이 실험을 능가하는 모습을 보이기도 했다.

실험물리학과 이론물리학의 비교 측면에서 볼 때, 노벨상 수상 업적을 내는 시기에서도 차이가 나타난다. 노벨 물리학상을 수상하는 평균 나이는 52.6세, 노벨상을 받는 연구를 한 시기와 수상을 한 시기의 차이는 15.1년이라는 수치만 놓고 본다면, 노벨 물리학상 수상자들은 대략 37.5세에 노벨상 수상 연구 결과를 내어 놓는다. 이를 실험 물리학자와 이론 물리학자로 나누어 비교해보면, 이론물리학자는 평균 34세에, 실험 물리학자는 평균 38.3세에 연구 성과를 내 놓는 것으로 나타나, 이론물리학자들이 대략 4년 정도 일찍 노벨상 수상 성과를 얻는 것으로 나타났다.

그 밖에 특징으로는 최근에는 노벨위원회가 노벨 물리학상 선정에 있어 좀 더 유연하고 탄력적인 태도를 취한다는 것이다. 1950년대 이전에는 “최신” 연구, “가장 중요한 발견이나 발명”이라는 노벨 물리학상의 선정 기준을 충실하게 따랐으나 최근에는 이 기준을 좀 더 탄력적으로 적용하고 있는데, 이는 충분히 검증된 연구를 선택하려는 경향에서 나타난 것으로 보인다.

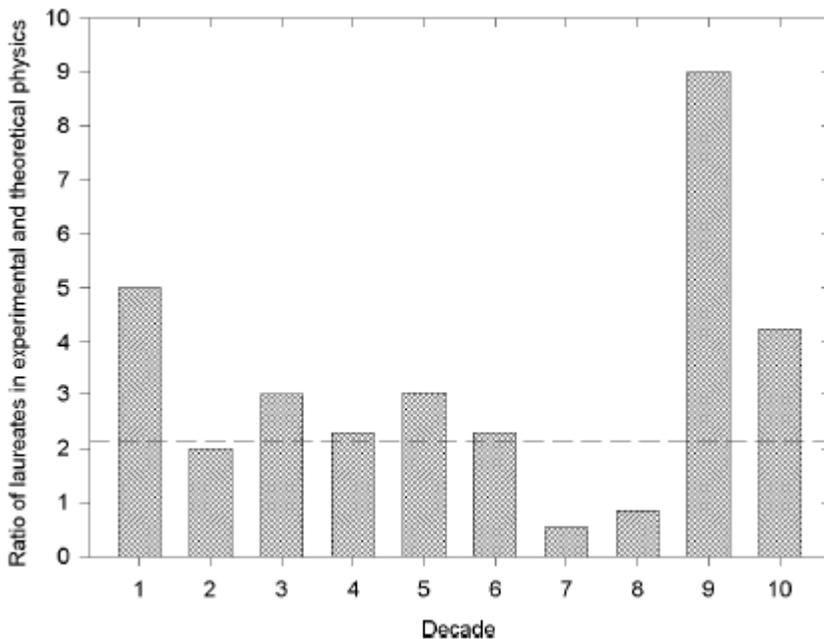


그림 3. 10년 단위로 분석한 노벨 물리학 수상 연구 중 실험물리학 대 이론물리학의 비율, 1900-2000. 점선은 평균을 의미 (출처: Karazija and Momkauskait, “The Nobel Prize in Physics,” p. 193.)

(2) 1980년대 이후 노벨위원회가 주목한 물리학 연구주제 분류

1980년 이후 노벨 물리학상 수상한 연구들을 중심으로 지난 30년 간 노벨 물리학상의 추이를 분석해 보면 최근 노벨위원회의 눈을 끌었던 연구 주제들은 무엇이었는지, 그 연구주제들은 어떻게 발전 혹은 진화해 나가고 있는지를 알 수 있다.

1980년 이후 지난 30년 간 노벨 물리학상을 탄 연구들을 분야 및 연구 주제를 중심으로 분류하여 보면 다음과 같은 특징을 볼 수 있다.

첫째, 노벨 물리학상에서 가장 큰 수상 비율을 점하고 있는 기본입자물리학은 1980년대 이후에도 계속해서 노벨위원회의 주목을 받아왔다. 1980~2011년까지 노벨 물리학상 중 10회, 약 1/3에 해당하는 노벨 물리학상이 고에너지 입자물리학, 특히 기본 입자의 표준 모형에 관련된 연구들에 수여되었다.

둘째, 노벨 물리학상에서 상대적으로 무시되어 왔다는 평가를 들어왔던 천체물리학 분야의 수상이 증가했다. 2011년 노벨 물리학상까지 포함하여 총 5회 수상을 기록하였다.

셋째, 고체 물리학 분야에서는 초전도체 및 초유체에 관한 연구가 총 3회의 노벨 물리학상을 수상하며 꾸준히 노벨위원회의 관심을 끌었다.

넷째, 집적회로 발명, CCD, 그래핀 등 실용적인 성격이 강한 연구들이나 스캐닝 터널링 현미경 설계, 레이저 원자 냉각 기술, 중성자 산란 기술 등 도구적 성격이 강한 연구들이 노벨 물리학상에서 적지 않는 비중을 차지하고 있다.

각 분야별 연구 주제에 대한 세부적인 학문분야분류는 국가과학기술표준분류를 중심으로 노벨상이 많이 수상되었던 분야를 묶어 분류하였다. 연구주제의 상호관계를 생각하면 많은 연구들이 시간으로 보나 이론의 발전 과정으로 보나 크게 보면 [현상발견] → [특성연구] → [응용 및 확장]의 순서에 따라 진화해 나가는 경향을 보이므로, 각 분야에 해당하는 연구들을 이 순서에 따라 배치하는 것을 원칙으로 삼고, 해당 시기의 연구 뿐 아니라 그 전사(前史)에 해당하는 노벨 물리학상 연구들까지 이 분류에 포함시켜 전체적인 주제의 흐

를 과약할 수 있도록 했다. 일부 분야, 예컨대 고에너지 입자 물리학과 같은 분야에서는 이 분류 방식이 제대로 적용되기 힘든데, 그런 경우에는 세부 연구 주제에 따라 재분류하는 방식을 채택했다. 이 분류 방식에 따른 결과는 다음과 같다.

① 입자/장/원자핵 물리학 [표 10]

고에너지 입자 물리학은 1980년대~2011년까지 가장 많은 노벨 물리학상을 배출한 분야이다. 이 분야는 1960년대 나온 표준 모형에서 예측한 기본입자를 검출하는 연구와 기본입자들이 매개하는 기본 힘에 대한 연구, 크게 두 개의 주제로 나누어지고, 이 연구들을 가능하게 하는 거대 가속기 건설이라는 공학적인 문제까지 포함한다.

노벨 물리학상에서 수상 업적이 나온 시기와 실제 수상 연도 사이에 약 15년의 시간차가 난다는 것은 잘 알려져 있지만, 고에너지 입자 물리학 분야에서는 이 시간차가 좀 더 큰 것으로 보인다. 표 10에 잘 나타나 있는 것처럼, 이 분야에서는 1960~1970년대 이루어진 연구들이 20~30년이 지난 1980년대~2011년에 노벨상을 수상하고 있다.

이는 이 분야의 연구 주제의 우선순위가 이 분야의 연구자들 사이에 이미 합의되어 결정되었기 때문인 것으로 여겨진다. 즉, 1960년대에 제안된 표준모형에서 예측된 입자들을 찾아내는 것과 기본 힘들의 통합을 이뤄내는 것이 가장 중요한 연구 주제로 이미 오래 전부터 정해졌기 때문에, 그 경로 상에서 이루어진 연구 성과들은 (다른 분야의 연구 주제들에 비해) 상대적으로 쉽게 그 가치를 인정받았고, 그렇게 인정을 받은 많은 연구들이 오랫동안 노벨 물리학상을 기다리면서 상대적으로 이 분야의 연구들의 노벨상 수상 시기가 늦춰졌던 것으로 보인다. 또한 발견의 목록이 이미 정해져 있다는 점에서 [현상 발견 → 특성 연구 → 응용 및 확장]이라는 일반적 경로를 따라가지 않은 점 또한 설명이 될 것이다.

이렇게 연구 주제의 우선순위가 정해져 있다는 점에서 현재까지의 노벨상을 잇는 그 다음 연구 주제가 무엇이어서 하는지 또한 다른 분야에 비해 비교적

분명한 편이다. 표준모형에서 예측한 기본 입자 중 유일하게 아직 발견되지 않은 힉스 입자 검출, 전자기 약력과 강력, 중력을 통합하는 이론과 관련된 실험이 이 분야의 가장 중요한 문제로 노벨상 0순위에 해당하는 연구라 할 수 있다. (최근 CERN에서 힉스 입자가 존재할 에너지 범위를 매우 좁은 영역으로 한정시키는 데 성공했다는 발표가 있었기에 가까운 장래에 이 주제로 노벨 물리학상이 나올 가능성을 예상할 수 있다.)

유망 연구 주제 발굴이라는 면에서 보면 연구 주제가 비교적 분명하게 정해져 있다는 점은 매우 뚜렷한 장단점을 지니고 있다. 성과를 얻기만 하면 쉽게 물리학계의 인정을 받을 수 있는 연구주제라는 점은 이런 연구 주제의 강점에 해당하지만, 누구나 그 연구 주제의 중요성을 인정하고 있다는 것은 그 연구 주제를 놓고 경쟁이 치열하다는 것을 의미하기도 한다.

② 천체물리학 [표 11]

천체물리학 분야의 노벨상 수상 주제들은 관측에 기반을 둔 천파천문학 분야와 좀 더 이론 지향적인 우주의 기원 및 구조에 관한 연구 분야로 나눌 수 있다.

천파천문학 분야는 우주초단파 배경 복사에 대한 지상에서의 관측부터 시작하여 최근에는 거대 전파 망원경을 우주로 직접 쏘아 올려 거기서 얻어진 풍부한 데이터를 분석하는 연구로 발전해 나갔다. 이에 따라, 거대 가속기에 거대한 그룹의 연구자들이 관여하는 입자물리학에서처럼, 천파천문학도 우주 공간으로 쏘아 올리는 거대 망원경을 중심으로 한 국제적인 네트워크에 참여하는 것이 좋은 주제를 선정하는 것만큼이나 중요한 과제가 될 것으로 보인다.

우주의 구조 및 기원에 관한 초창기 연구가 핵물리학이나 양자역학적인 원리를 천체에 응용한 성격이 강했다면, 최근의 연구는 천파천문학에서의 관측들을 바탕으로 한 성격이 강해지고 있는 것으로 보인다.

그동안 천체물리학은 그 유명세에 비해 노벨 물리학상에서는 상대적으로 무시되어 왔지만, 2000년대에 들어와 벌써 3회나 수상을 했을 정도로 노벨위원회의 관심이 높아지고 있는 분야라고 볼 수 있다. 최근의 수상으로 노벨 위원

[표 10] 입자물리학*

기본 입자 (예측, 실험 등)	기본 힘 (모델링, 법칙 등)	실험 테크닉
루비아, 반 데르 미어 (1981/1984) W입자, Z입자 존재 입증	코바야시, 마스카와 (1973/2008) broken symmetry의 기원 발견, 자연계에 3종의 쿼크종 예측	샤르파크 (1968/1992) 다중선 비례상자 개량
펠 (1974/1995) 타우 렙톤 발견	엠틀호프트, 벨트만 (1971/1999) Yang-Mill 이론의 재규격화를 통해, 약한 상호작용의 quantum structure 연구	
리히터, 차오 칭 텡 (1974/1976) Charm quark 발견		
레더만, 슈와르츠, 슈타인버거 (1962/1988) 뮤온 뉴트리노 발견	그로스, 폴리처, 윌첵 (1970s/2004) 강한 상호작용에서의 점근자유성 발견	
프리드만, 켈달, 테일러 (1968/1990) deep inelastic scattering 실험으로 쿼크 존재 최초로 입증 (up/down/gluon)	글래쇼(1960), 살람&와인버그(1967) (1979) 표준모형 제시 (전자기력+약력+힉스메커니즘)	
머레이 겔만 (1963/1969) 기본 입자 분류, 쿼크 제시	피치, 크로닌 (1964/1980) 중성 K-meson 붕괴시 CP violation 발견	
프레데릭 레인스 (1956/1995) 전자 뉴트리노 발견	리, 양 (1957) parity 보존 violation	글레이저 (1960), 알버레즈 (1968) 버블 챔버 발명, 개량, 데이터

* 연구자 옆의 숫자는 (수상연도) 혹은 (발견연도/수상연도)를 의미

회에서 이 분야의 대표성 또한 높아졌을 것으로 여겨진다.

천체물리학에서 노벨 물리학상의 수상이 유망한 주제로는 일반상대성 이론의 검증에 관한 연구와 암흑물질, 암흑에너지에 관한 연구이다. 이 두 주제는 이 분야에서 그 연구 성과를 오랫동안 기다려 왔고 그런 만큼 이 분야 연구자들의 관심이 집중되어 있는 분야로, 그만큼 많은 연구자들이 뛰어들고 있어 경쟁도 심하다고 볼 수 있다.

③ 응집물질 물리학 [표 12]

응집물질 물리학은 물리학에서 연구하는 학자의 수로 보나 다양한 세부 연구주제 관점에서든 가장 큰 분야로, 80년대 이후 거의 30% 이상의 수상자를 배출한 분야이다.

이 연구 분야 내에서 저온 연구는 주제를 기준으로 한 분야 구분이라기보다는 현상이 나타나는 물리적 조건을 기준으로 나눈, 약간은 특이한 구분이다. 저온 연구는 극저온에서 나타나는 양자 효과를 규명하는 데 주로 관심을 둔다. 절대 영도에 가까운 극저온에서 나타나는 양자현상인 초전도 현상이나 초유체 현상, 양자홀 효과 등 저온에서 응집 물질의 양자역학적 물성에 초점을 맞춘 연구 업적이 꾸준히 노벨상을 수상하였다.

또한 액정 고분자, 반도체 연구, 거대자기저항 효과와 같이 기초 연구 성과가 실용적인 연구로 이어질 가능성이 높은 주제들도 수상을 하였는데, 이런 점에서 볼 때 다른 분야에 비해 기초 연구와 실용 연구의 간격이 좁은 편이다. 특히 최근 2000년대에 노벨 물리학상 선정 주제들 중에 CCD나 거대 자기저항 연구처럼 실용성이 높은 연구들이 점점 많이 포함되는 추세이다.

[표 11] 천체물리학

	전파천문학	우주의 기원 및 구조 연구	
특성 이론		펠머터, 리스, 슈밋 (2011) 초신성 관측으로 우주 팽창 증거 발견	
		마터, 스무트 (2006) 우주 배경 복사의 이방성, 흑체 형태 발견	
	데이비스 주니어, 코시바 (2002) 코스믹 뉴트리노 검출	지아코니 (2002) 우주 X선원 발견, X선 망원경	
		헐슨, 테일러 (1974/1993) 새로운 타입의 펄서 발견으로 중력파의 간접 증거 제시	
		파울러 (1960/1983) 우주 화학 원소 형성의 핵반응에 대한 연구	
		찬드라세카 (1934/1983) 별의 진화와 구조에 대한 이론적 연구	
80년 이전 (특성 연구)	펜지아스, 윌슨(1965/1978) 우주 초단파 배경 복사 연구	라일, 휴위시 (1967/1974) 펄서 발견 등 전파천체물리학에 기여	베테 (1938/1967) 별에서의 핵반응에 관한 이론
	블랏켓 (1933/1948) 윌슨 구름상자 방법 개선	헤스 (1936) 우주선 발견	

[표 12] 응집물질 연구

	양자 효과(저온 연구)			기타 응집 물질
	초유체 연구	초전도체 연구	양자 홀 효과	
응용 확장				알페로프&크뢰머(2000) 복합반도체/직접희로 개발
특성 이론	아브리코소프&긴즈부르크&레짓(2003) 초전도체와 초유체의 질서도에 대한 이론적 설명	리클린&슈퇴르머&추이 (1982/1998) 분수전하를 가진 양자홀 효과		
	리&오셔로프&리차드슨(1972/1996) 헬륨-3의 초유체 발견	게로로크&뮐러&레드노르츠 (1986/1987) 상온초전도체	클린칭(1980/1985) 양자홀 효과	드젠(1974/1991) 액정 연구
현상 발견				페르그뤼베르크(2007) 거대자기저항효과발견
80 년 이 전	란다우(1941/1962) 액체 헬륨의 특성에 관한 이론	카피차(1965/1978) 액체 헬륨 실험 테크닉	바딘&쿠퍼&슈리퍼(1957/1972) 초전도이론	
		온네스(1907-8/1913) 저온연구, 액체헬륨 생산, 초전도체 연구		

④ 광학 [표 13]

광학분야에서는 80년 이후 4번 수상자가 배출되었다. 주로 레이저를 이용한 연구에 노벨상이 돌아갔는데, 비선형 광학 연구, 레이저를 이용한 원자의 냉각 기술 및 이를 통한 개개 원자의 제어 기술, 저온 상태의 보즈-아인슈타인 응축에 대한 연구, 양자광학과 이를 활용한 정밀 분광법 개발 등이 수상하였다. 이들 연구주제에서도 다른 연구 주제들과의 상호적인 관계들, 특히 레이저 기술 연구들을 기반으로 한다는 점에서 이 분야에서 이루어지는 연구들은 여러 방향으로 확장 혹은 응용될 가능성이 매우 높은 편이다.

⑤ 원자분자/통계/기타장비 관련 물리

앞서 언급한 네 분야를 제외한 분야에서는 수상자가 비교적 드물게 나오고 있다. 통계역학의 경우는 임계현상에 재규격화 군을 도입하여 상전이를 통일적으로 이해하려는 통계이론연구가 1982년도에 수상한 이후에는 수상자가 나오지 않고 있다. 원자분자물리의 실험과 관련되어 램지 공명법에 의한 원자시계와 이온트랩 연구가 1989년도에 수상한 이후 이 분야도 수상이 없다. 연구장비 개발과 관련되어, 앞서 언급한 분야들의 연구에 새로운 연구방법 도입도 같이 포함되는 경우가 상당수 있다. 연구 장비개발에 수상이 주어진 경우는 전자현미경과 Scanning Tunneling Microscopy 개발(1986년 수상)과 광통신 장비로 중요한 광섬유 및 CCD 센서의 개발(2009년 수상) 등이 있다.

[표 13] 광학

	레이저 연구	보즈-아인슈타인 응축
응용 확장	글로버, 홀, 헨슈 (2005) 레이저 분광학 연구	추, 코앙타누지, 필립스 (1980년대/1997) 레이저 원자 냉각, 포획법 개발
특성 연구		코넬, 위만, 케테를레 (2001) 최초로 순수한 상태의 보즈 응축물 형성
현상 발견	솔로, 블루메르헨 (1950년대/1981) 레이저 제작, 레이저 효과의 이론적 설명	
80년 이전	카피차(1978), 알렌, 미즈너 헬륨-4 초유체 발견	보즈, 아인슈타인 (1924-1925) 보즈-아인슈타인 응축 상태 예측

[표 14] 원자분자 / 통계 / 기타 장비관련 물리

	통계역학	원자/분자 분리	장비관련
응용 확장			가오, 보일, 스미스(2009) 광섬유, CCD 개발
			셜, 블록하우스(1960년대/1994) 중성자 산란기술 개발
		램지, 파울, 데멜트(1950년대/1989) 전자시계, 이온트랩 개발	루스카(1933/1986), 비니히, 로러(1981/1986) 전자현미경, STM 개발
특성 이론	월슨(1970/1982) 상전이 분석		
현상 발견			

(3) 징후적 지시자 분석을 통한 미래 유망 연구주제 발굴

미래 유망 연구주제 발굴을 위하여 물리학, 화학, 생리학의 미래 유망 연구주제를 단·중기(10년 이내)와 장기(10년 이후)로 구분하여 전망 하고자 한다.

주커만(Harriet Zuckerman)이 조사한 통계에 의하면 노벨 물리학상의 경우 수상 연구 후 노벨상 수상까지 소요된 평균기간은 1901년부터 1972년도까지 12.3년이며, 수상자 평균 나이는 47.0세이다.¹⁵⁾ 1901년부터 2000년까지를 보면 수상 연구부터 수상까지가 15.1년, 수상자 평균 나이는 52.6세로 수상 연구부터 수상까지의 기간은 더 길어지고 수상자 나이는 더 늦어지는 추세를 확인할 수 있다.¹⁶⁾ 이런 통계로부터 앞으로 10년 이내에 수상할 가능성이 있는 연구는 현재 진행 중이거나 꽤 무르익은 상태라고 추정할 수 있으며, 수상 주제와 연구자는 거의 예측이 가능하다고 볼 수 있다.

앞서 언급한 징후적 지시자에 의하여 단·중기적으로(10년 이내) 수상 가능한 연구주제와 수상자에 대하여 예측을 할 수 있을 것이다. 물리학의 징후적 지시자인 울프 물리학상은 전체 수상자 중에 30%정도가 노벨상을 수상하였고 평균 수상격차는 약 6년이다. 다른 징후적 지시자로 톰슨로이터에서 매년 노벨상 발표 직전에 발표하는 인용상에 근거한 수상 예측이 있으며, 노벨재단에서 노벨위원회를 중심으로 개최되는 노벨심포지엄의 주제와 초청연사도 역시 좋은 징후적 지시자라고 볼 수 있다.

단·중기적 예측은 울프상의 물리학 부분과 톰슨로이터에서 예측된 연구 주제 중 아직 수상하지 않은 주제와 노벨 심포지엄의 주제 중에서 선정하였다. 징후적 지시자들은 현재 어떤 주제들이 각광 받고 있는 주제인지, 비교적 가까운 미래에 노벨상 수상이 기대되는 연구 주제가 무엇이며, 예상되는 수상자가 누구인지를 파악하는 데 있어서도 유용하게 이용될 수 있다.

15) Harriet Zuckerman, *Scientific elite: Nobel laureates in the United States* (New York: Free Press, 1977)

16) Karazija and Momkauskait, "The Nobel Prize in Physics."

◆ 단·중기 전망¹⁷⁾

① 입자물리학

소립자 연구는 계속 중요한 연구주제가 될 것이다. 중성미자는 질량이 없는 것으로 알려져 왔으나 최근 관측과 실험을 통해 질량이 있을 가능성이 높은 것으로 보고되고 있다. 중성미자의 정확한 질량을 측정하게 되면 질량이 없다는 가정에 근거해 세워진 입자 이론의 기반이 크게 흔들리게 되어 새로운 입자물리학 이론이 요구될 가능성이 높다. 양자크로모역학(QCD)의 해가 끈이론(String Theory)을 통해 해결될 수 있는지를 비롯한 궁극적인 통일이론의 연구도 계속 주요한 유망 연구주제이다.

-
- | | |
|---|--|
| · 중성미자의 질량 측정 | 톱슨로이터(07) & 노벨심포지엄(04-129)
Arthur McDonald & Yoji Totsuka |
| · 끈이론 및 양자크로모역학 | 톱슨로이터(02) & 노벨심포지엄(03-127)
Michael Green & John Schwarz & Edward Witten |
| · 아원자입자의 비대칭화에 의한
질량생성 연구 | 울프(04) Francois Englert & Peter Higgs |
| · Particle physics and Universe | 노벨심포지엄(98-110) |
| · Particle traps and related
fundamental physics | 노벨심포지엄(94-91) |

② 천체물리학

천체물리학 분야에서 우주에 존재하는 미지의 물질(존재)에 관한 연구가 한창 진행 중이다. 예를 들면, 암흑물질과 암흑에너지에 대한 연구는 우주를 구성하는 물질 및 구조, 우주의 진화 과정을 밝히는 데 있어 가장 중요한 연구주제라고 할 수 있다.

-
- | | |
|--|--|
| · 우주 특이점의 필요성과 블랙홀 특성을
보인 일반상대성 이론의 발전을 위한 연구 | 울프(88) & 톱슨로이터(08) Roger Penrose
울프(88) Stephen Hawking |
| · 우주팽창 이론 | 톱슨로이터(06) Alan Guth & Andrei Linde &
Paul Steinhardt |

17) 노벨심포지엄은 (개최 연도·심포지엄 번호)를 의미.

중요성 연구

- 은하계의 회전관련 문제 톰슨로이터(08) Vera Rubin
- 우주배경복사에 관한 WMAP 실험 톰슨로이터(10) Charles Bennett & Lyman Page & David Spergel
- Barred Galaxies and Circumnuclear activity 노벨심포지엄(95-98)
- Birth and early evolution of our universe 노벨심포지엄(90-79)

③ 응집물질 물리학

응집물리학 분야에서는 양자적 응집물질이나 양자적 관련 연구, 나노물질 연구, 새로운 전기, 자기, 광학적 성질을 가지는 물질에 대한 이론 및 실험 연구가 매우 활발하게 진행되고 있다. 많은 물리학자들이 이 분야에 속해 있으며, 이들 중 다수가 기초연구 뿐 아니라 응용연구에 종사하고 있다. 즉, 순수한 물리학 이외에 화학, 재료공학 등 다양한 분야에서 연구하는 학자들이 많기 때문에 우수한 논문의 경우 인용수가 많다. 이런 이유로 특히 톰슨로이터 인용상에 의해 상당히 많은 학자들이 노벨상 후보로 지명되었다.

-
- 금속 내 전자 운동에 관한 이론연구 울프(85) Conyers Herring & Philippe Nozieres
 - 저차원등 특이 구조 응집체 이론연구 울프(90) David Thouless, 울프(02) Bertrand Halperin, 노벨심포지엄(NJC91-1)
 - 특이 전하와 스핀정렬 전이금속산화물 합성 및 특성연구 톰슨로이터(02) Yoshinori Tokura
 - 질화갈륨 LED 톰슨로이터(02) Shuji Nakamura
 - 저차원 탄소나노물질 연구 톰슨로이터(07) Sumio Iijima
 - 표면 플라즈몬 포토닉스 톰슨로이터(10) Thomas Ebbesen
 - 포토닉 밴드갭 물질의 개발 및 응용 톰슨로이터(11) Sajeev John & John Yablonovitch

④ 광학/원자분자 물리학

양자역학을 발전시키고 검증하기 위한 이론 연구 그리고 실험 연구로서 레이저를 이용한 원자 냉각 및 원자 제어 기술, 또는 보즈-아인슈타인 응축의 응용 연구가 유망 연구주제라고 할 수 있다.

-
- | | |
|--|---|
| · Aharonov-Bohm effect와 Berry phase같은 양자 위상기하학적 상의 발견과 타 물리 분야에 적용연구 | 울프(98) & 톰슨로이터(09)
Yakir Aharonov & Michael Berry |
| · 수소메이저, 리드버그원자, 보즈-아인슈타인 응축을 포함한 수소 원자물리 연구 | 울프(05) Daniel Kleppner |
| · EDFA(Erbium-doped fiber amplifier) 레이저 개발 | 톰슨로이터(06) Masataka Nakazawa & David Payne |
| · 양자컴퓨팅과 양자정보이론 | 톰슨로이터(09) Juan Cirac & Peter Zoller
노벨심포지엄(09-141) |
| · 음의 굴절률을 가진 새로운 물질 개발 및 응용 | 톰슨로이터(09) John Pendry & David Smith |
| · 벨 부등식 관련 실험과 양자적 얽힘에 관한 연구 | 울프(10) & 톰슨로이터(11)
Alain Aspect & John Clauser & Anton Zeilinger |
| · 초전도 조지프슨 접합(Josephson Junction)과 같은 초전도 큐비트(quantum bit, qubit)에 대한 연구, 양자얽힘 및 decoherence, 양자측정과 에러 수정에 관한 연구 | 노벨심포지엄(01, 09) |
| · Modern studies of Basic Quantum concepts and phenomena | 노벨심포지엄(97-104) |
| · Heavy ion spectroscopy and QED effects in atomic systems | 노벨심포지엄92-85 |
-

⑤ 통계역학/기타 측정관련연구

복잡시스템의 비선형 동역학의 이론과 실험적 연구는 계속 주목을 받고 있지만 노벨상 수상자가 나오지 않았다. 2차레 울프 물리학상이 나왔지만 최근에는 덜 주목을 받고 있다.(1993년 울프상 수상자 만델브로트(Benoit Mandelbrot)는 2010년 사망함) 최근 생물물리 분야의 통계역학적 연구가 물리학, 화학, 생명과학과의 학제 간 연구로 활발히 진행되고 있다. 2011년 울프상은 정밀한 측정을 위한 장비개발에 주어졌고 새로운 측정장비는 물리학에 항상 중요한 연구 주제이다.

· 카오스현상의 비선형 시스템 연구	울프(86) Mitchell Feigenbaum & Albert Libchaber
· 피코미터수준 정밀도의 Aberration-corrected electron microscopy 개발	울프(11) Maximilian Haider & Harald Rose & Knut Urban
· Quantum Chaos	노벨심포지엄(00-116)

⑥ 학제 간 주제

노벨 심포지엄에서 심도 깊게 다루어졌던 학제 간 주제들은 노벨위원회의 관심이라는 점에서 뿐 아니라, 과학의 최첨단의 주제라는 면에서 주목할 만하다. 물리학을 중심으로 열렸던 노벨심포지엄의 학제 간 연구 주제들을 정리해 보면 다음과 같다

2011년	3M: 기계, 분자, 정신 (Machines, Molecules and Mind)	‘뇌’에 초점을 맞춰 생각으로 움직이는 인공기계(thought-directed prostheses)부터 전자기기, 화학반응, 뇌기능, 정신, 의학까지의 다양한 주제들에 대해 총 30개의 발표가 이루어짐
2007년	행성 체계의 물리학	태양계 밖의 지구 유사 행성에 관한 연구 및 행성체계의 진화를 다룸
2006년	우주화학과 분자 천체물리학	우주진화과정에서 원자, 분자와 화학 반응 그리고 생명의 기원에 대해 던지는 함의
2005년	우주의 에너지, 분자, 그리고 생명	물리, 화학, 생리학의 3개 분야가 처음으로 함께 한 심포지엄으로, 우주론적 관점에서 본 에너지, 생명과 진화의 원동력으로서의 에너지 흐름, 사회를 위한 에너지원 관리, 미래 에너지원 등 폭넓은 주제를 다룸
2005년	생물 시스템과 인공 시스템에서의 제어된 나노 운동	나노 스케일 모터의 운동 제어라는 주제를 중심으로, 나노 스케일 모터의 모델로서 생물 단분자(single-biomolecule) 모터의 구조와 기능, 힘, 에너지 효율, 동역학에 대한 연구, 생물 분자와 인공적인 나노 디바이스의 결합 연구, 나노스케일 운동 제어의 응용 등을 다룸
2000년	클러스터의 물리학과 화학	분자 또는 원자들로 이루어지는 클러스터들의 구조 성질 등의 물리적 화학적 연구 주제를 다룸

장기적인 주제를 예측하는 것으로서는 최근 교육과학기술부에서 시행한 “기초과학연구 100대 유망 연구영역 선정을 위한 기획연구”에서 물리 부분의 주제를 포함하였다.¹⁸⁾ 2003년 노벨 물리학상 수상자인 진즈부르크(Vitaly L. Ginzburg)가 21세기 물리학의 “Physics minimum 30”으로 제시한 것¹⁹⁾, 그리고 2004년 노벨 물리학상 수상자인 데이비드 그로스(David J. Gross)가 2005년 1월 CERN에서 행한 강연 “Future of Physics”의 내용²⁰⁾도 포함시켰다. 진즈부르크와 그로스의 예측은 비록 거의 10년과 8년 전에 된 것이지만 장기적인 전망을 보여주는 데 좋은 연구주제들이기에 정리하였다. 또한 저자 John R. Vocca가 노벨 수상자 40여명을 비롯하여 60여명을 인터뷰하여 저술한 “The world's 20 greatest unsolved problem”에 제안한 주제 중에 물리학에 관련된 9 주제를 역시 정리 하였다.

◆ 장기 전망

기초연구 100대 유망 연구 물리부문
(기초연구사업추진위원회, 교육과학기술부 2011.5)

여기서 언급된 연구주제는 1차적으로 논문분석과 전문가 추천을 거쳐 선정된 것을 2차로 전문가의 설문조사를 거치고, 최종적으로 산학연 전문가 20인이 선정한 것이다. 1), 2), 3), 7), 9), 10)등의 주제는 그 분야의 일부 소주제들이 단·중기적 주요주제에서 언급된 것이다. 그리고 기초과학으로서의 물리학보다 최종의 응용에 초점이 맞추어져 있는 주제도 있기 때문에 이러한 응용을 달성하기 위한 기초적인 세부 연구 주제를 발굴해야 할 것이다.

-
- 1) 저차원 탄소나노물질(그래핀/탄소나노튜브) 물성 및 소자
 - 2) 나노포토닉스
 - 3) 고에너지 물리학
 - 4) 초고효율 양자점 태양전지

18) 백동열 등, 『기초과학연구 100대 미래유망 분야 선정을 위한 기획 연구』 (더비앤아이, 2011); 교육과학기술부, 『기초연구 100대 미래유망분야 선정결과 및 활용방안(안)』 (2011) 참조.

19) Vitaly L. Ginzburg, “On Superconductivity and Superfluidity,” *Nobel Lecture* (2003), pp. 96-127.

20) 데이비드 그로스의 CERN 강연 동영상과 강연 자료는 다음 사이트에서 볼 수 있다.

<http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=a05302> (2012. 1. 15. 접속)

- 5) 초전도 신소재 : 특히 초전도체, 다강체, 중페르미온 물질 등
- 6) 스핀과학 및 응용 : 스핀논리소자, 스핀열전 효과 등 새로운 현상 원리규명 및 효과
- 7) 입자물리학 현상론 및 끈이론
- 8) 테라헤르츠파 발진 및 측정 : 바이오이미징, 재료과학에 유용한 연구
- 9) 메타물질 및 응용
- 10) 복잡계 및 통계 물리

진즈부르크의 21세기 물리학의 "Physics minimum 30" (2002 노벨상 강연)

아래 30개의 연구 주제 중에는 이미 어느 정도 연구가 진행된 것도 있지만 가까운 시일 내에 풀리지 않을 장기적인 주제도 있다.

- 1) 제어 핵융합
- 2) 고온 및 상온 초전도체
- 3) 금속 수소 및 다른 흥미로운 물질들
- 4) 2차원 전자 액체 · 이와 관련된 이상 홀효과나 다른 효과들
- 5) 고체 상태 물리학에 관한 질문들 · 반도체의 이질구조
· 양자 우물과 양자점(quantum dots)
· metal-dielectric transitions
· charge and spin density waves
· mesoscopics
- 6) 2차 상전이 혹은 관련된 상전이 · 이에 관한 예들
· 초저온 냉각 (특히, 레이저 냉각)
· 기체의 보즈-아인슈타인 응축
- 7) 표면 물리. 클러스터.
- 8) 액정 및 Ferroelectrics, Ferrotoroids.
- 9) 풀러린(Fullerene)과 나노튜브
- 10) 초강력 자기장에서의 물질의 행동

- 12) 레이저 · X선 레이저
· 감마선 레이저
· 초고출력(Super-high power) 레이저
- 13) 초중량(superheavy) 원소, 특이한 원자핵
(exotic nuclei)
- 14) Mass spectrum, 쿼크와 글루온, 양자 크로모다이나믹스,
쿼크-글루온 플라즈마
- 15) 약한 상호작용과 전자기 상호작용의 통합 이론,
W와 Z 보손, 렙톤
- 16) 표준모형 대통일 이론, 양성자 붕괴, 뉴트리노의
질량, 자기 모노폴
- 17) 기본 길이, 고에너지/초고에너지에서의 입자 상호
작용, 입자가속기
- 18) CP-invariance의 비보존
- 19) 진공 및 초강력 자기장에서의 비선형 현상, 진공
에서의 상전이
- 20) 끈 이론, M-theory
- 21) 일반상대성 이론의 실험적 입증
- 22) 중력과 검출
- 23) 우주론적 문제들 · 팽창, Λ -terms and 'quintessence'
- 24) 중성자별과 펄서, 초신성
- 25) 블랙홀, 우주끈
- 26) 퀘이사와 galactic nuclei, 은하의 형성
- 27) 암흑물질(숨겨진 질량) 문제와 검출
- 28) 초-고에너지 우주선의 기원

2004년 노벨상 수상자 데이비드 그로스 “Future of Physics”

(2005년 1월 CERN에서 행한 강연)

이 예측도 이미 8년가량 경과한 것이기 때문에 언급된 주제 중에는 상당히 연구가 진행된 주제들도 포함되어 있지만 장기적으로 연구해야 한 주제들이 많이 포함되어 있다. 그리고 21번 이후의 언급주제는 물리학의 연구주제라기 보다는 과학학 또는 과학철학의 연구주제라 볼 수 있다.

- | | |
|-------------------------|--|
| 1) 우주의 기원 | · 빅뱅이 있었는가? |
| 2) 암흑물질의 특성 | · 암흑물질은 미지의 입자로 구성되어 있는가? |
| 3) 암흑에너지의 특성 | · 암흑에너지의 미시물리적(microphysical) 기원은 무엇인가?
암흑에너지는 일정한가, 변하는가? |
| 4) 우주 구조의 형성 | · 저온 암흑물질의 표준 패러다임의 검증 |
| 5) 일반상대성 이론의 유효성 | · 일반상대성 이론은 모든 스케일에 적용될 수 있는가,
강력장에서도 적용될 수 있는가? |
| 6) 양자역학의 유효성 | · 양자역학은 근거리나 거대계, 우주에서는 변형되어야
할까? |
| 7) 입자 표준모형에서 풀리지 않는 문제들 | · 입자의 유형, 질량과 mixing, 힘의 통일 등 |
| 8) 초대칭의 존재 여부 | · 새로운 물리학을 위한 이것이 가능한 에너지상태에서
나타나겠는가? |
| 9) 양자크로모역학의 해 | · 양자크로모역학(QCD)의 해는 끈모형(string theory)을
통해 analytical하게 해결될 수 있는가? |
| 10) 끈 이론의 특성 | |
| 11) 공간과 시간의 특성 | · 공간과 시간은 근본적인 현상인가, 창발적(emegent)
현상인가? |
| 12) 물리학의 법칙 | · 물리학의 법칙은 unique한가? 아니면 통계적인 우연
(accident)인가? |

- | | |
|--|---|
| 15) 컴퓨팅의 복잡성에 관한 이해 | · 근사(approximation) 방식을 쓰는 장치를 넘어선 장치를 만들어 낼 수 있을까? |
| 16) 양자컴퓨터 만들기(construction) | · 10,000 qbit 컴퓨터가 유용할까? |
| 17) 실온 초전도체 존재 여부 | |
| 18) 생물학에서의 이론의 존재 여부 | · 물리학처럼 생물학에도 그 기저에 개념적인 구조 (conceptual structure)가 있을 수 있을까? |
| 19) 유전체학으로부터 물리적 형태를 이끌어낼 수 있는가? | · 생물체의 형태를 DNA 서열로부터 이끌어낼 수 있을까? |
| 20) 의식(consciousness)의 물리적 기반은? | |
| 21) 컴퓨터는 창조적인 물리학자가 될 수 있을까? | · 뉴턴부터 아인슈타인까지 컴퓨터를 교육시킬 수 있을까? |
| 22) 물리학의 파편화(balkanization)를 어떻게 막을 수 있을까? | · 서로 다른 분야의 사람들이 서로를 이해할 수 있어야함 |
| 23) 환원주의의 범위 | · 환원주의는 보편적인 것일까, 아니면 복잡계에서 새로운 법칙이 등장하게 될까? |
| 24) 이론의 역할 | · 이론은 실험을 이끄는가, 아니면 실험을 뒤따르는가? |
| 25) 비현실적인 거대 물리학 프로젝트에 의존하지 않도록 하는 방법 | · 거대 프로젝트들은 규모, 비용, 시간 스케일이 계속 해서 증가할 수밖에 없다. 그것을 피하는 방법은? |

“The world's 20 greatest unsolved problem” 물리학 부문

(John R. Vocca, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA 2005)

노벨상 수상자 40여명을 포함한 60여명의 세계적으로 저명한 학자들을 인터뷰할 결과를 저자가 정리한 것으로 이 책은 물리학, 화학, 생리학, 지구과학의 기초 과학 분야의 중요하지만 아직 해결하지 못한 20개의 문제를 자세히 소개하고 있다. 그 중 물리학관련 주제는 9개이다.

-
- 1) Astronomy : The mystery of Dark Matter
 - 2) Cosmology : The Creation of Universe
 - 3) Theoretical Cosmology and Particle Physics: The Cosmological Constant Problem
 - 4) Gravity : The Construction of a Consistent Quantum Theory of Gravity
 - 5) Particle Physics : The Mechanism that makes Fundamental Mass
 - 6) Particle Physics and Astronomy : The Solar Neutrino Problem
 - 7) Astrophysics : The Source of Gamma-Ray Burst
 - 8) Theoretical High-Energy Physics : The Unification of the Basic Forces
 - 9) Solid State Physics : The Mechanism Behind High-Temperature Superconductors

이상에서 제안된 연구 주제를 통해 미래의 물리학이 나아갈 방향성을 다음과 같이 요약·정리 할 수 있다.

- 입자의 구조, 더 나아가 근본적인 대통일장이론의 유효성 여부
- 우주의 근원과 구조
- 새로운 응집물질의 개발과 그 이론
- 양자역학의 더욱 근본적인 이해와 그의 응용
- 생명체를 포함한 복잡계의 물리학적 이해

다. 노벨 화학상을 중심으로 본 우수 주제

(1) 노벨 화학상의 일반적 특징

노벨 화학상은 초기에 열화학 및 용액화학 분야, 원소의 발견과 동위원소 및 핵반응 분야 그리고 유기화학 및 생화학물 연구 분야에서 많은 수상자를 배출하였다. 열역학을 화학반응에 적용하는 용액화학 등 열화학 분야는 1901년 첫 번째 수상자인 반트호프(Jacobus Henricus van't Hoff)와 1903년 수상자인 아레니우스(Svante Arrhenius)를 비롯하여 오스트발트(Wilhelm Ostwald), 네른스트(Walther Hermann Nernst) 등의 20세기 초에 다수의 수상자를 배출하였다. 그러나 20세기 후반에는 1968년 온사거(Las Onsager, 비가역 과정 열역학)와 1977년 프리고진(Ilya Prigogine, 비평형 열역학) 두 수상자 밖에 없었다.

원소, 동위원소 및 핵반응 분야에서는 비활성기체 연구의 램지(William Ramsay), 플루오르 화합물 연구의 무아상(Henri Moissan), 원소붕괴 연구의 러더포드, 라듐과 폴로늄 발견의 퀴리 등 20세기 전반기에 많은 수상자를 내었으나 역시 20세기 후반기에는 1951년 맥밀란(Edwin M. McMillan), 시보그(Glenn Theodore Seaborg, 초우라늄 원소 발견)와 1960년 리비(Willard Frank Libby, 동위원소 탄소이용 연대 측정법 개발)이후에는 수상자가 없다.

유기화학과 생화학분야는 노벨 화학상 초기부터 꾸준히 수상자가 배출되는 분야이다. 1902년 당과 퓨린 합성에 관한 연구로 에밀 피셔(Emil Fischer)가 수상한 이후, 약 20년간 유기염료 연구로 폰 베이어(Adolf von Baeyer), 비세포적 발효 연구로 부흐너(Edward Buchner), 지방족 화합물의 결합 연구로 발라흐(Otto Wallach), 유기화합물의 새로운 합성법 발견으로 그리냐르(François Auguste Victor Grignard)와 사바티에(Paul Sabatier) 등이 수상하였다. 20세기 전반기에 꾸준히 수상자를 배출하였지만 후반기에도 유기합성분야는 5-10년에 한 번 정도 수상자가 배출된다. 그러나 물리유기분야는 80년 이후 한 명의 수상자도 배출하지 못하였고 반면, 실용적인 응용 분야에 가까운 고분자화학 분야에서는 합성 또는 물성 연구가 10-20년 정도에 한 번 정도 수상자를 배출하고 있다. 생화학 관련 분야는 꾸준히 수상자가 배출되고 있는데 20세기 전반기에는 호르

몬이나 비타민 같은 생리활성물질에 관한 연구에서 수상이 많았던 반면 후반기에는 단백질과 핵산의 구조분석과 생체 내 반응과정 연구에서 자주 수상자를 배출되고 있다. 특히, 80년대 이후에는 다른 분야보다 수상자가 더 자주 배출되는 경향을 보이고 있다.

노벨 화학상 수상자 중에는 화학자가 아닌 경우도 다수 있다. 이는 화학이라는 학문 자체가 자연과학의 타 학문들을 전반적으로 아우르는 면이 있기 때문인 것으로 생각된다. 특히 20세기 전반부에는 러더포드, 퀴리 등 다수의 물리학자들이 화학상을 수상하였고, 후반부에는 페루츠(Max Perutz), 생거(Frederic Sanger)와 같은 생명과학 관련 연구에 여러 번 상이 돌아갔다.

20세기 후반기에 10년에 한 번 정도로 꾸준히 수상자를 배출하는 분야로 화학결합에 관한 분광 및 이론 연구 분야, 화학반응속도 및 반응동역학 분야, 분리분석 화학 분야, 고분자 화학이나 재료나노 화학 분야 등이 있다. 화학결합을 연구하는 분야는 20세기 초반 물리학에서 새롭게 등장한 양자역학을 화학 반응에 응용한 분야로서, 폴링(Linus Pauling)과 멀리컨(Robert Mulliken)이 1930-40년대에 이론 연구 업적으로 50-60년대 수상하였다. 특히 화학결합에 대한 컴퓨터 활용과 이론연구는 지속적으로 중요한 연구 주제였다. 실험적인 측면에서 화학반응 속도 및 반응동역학 분야도 분자빔과 초고속레이저를 활용한 실험을 중심으로 지속적으로 수상자를 배출하고 있다.

분리 및 분석분야는 원소들의 원자량측정에 대한 공로로 1914년 리차드(Theodor Richard)의 수상 이후 지속적으로 많은 수상자를 배출하였다. 화학연구에서 모든 분야에 걸쳐 화합물의 분리와 분석은 가장 기본적인 연구수단이다. 이 분야는 특히 화학의 다른 분야들과 연관을 가지면 특히 최근에는 생화학물의 분석과 관련한 연구가 수상자를 배출하고 있다. 고분자 및 거대분자 화학, 재료화학, 나노화학 등은 20세기 후반부에 노벨 화학상에서 특히 주목을 받는 분야라고 할 수 있다.

(2) 1980년대 이후 노벨위원회가 주목한 화학 연구주제 분류

1980년대 이후 노벨 화학상 수상분야를 살펴보면 앞으로 유망한 연구 분야 및 주제에 대해 어느 정도 예측을 할 수 있다. 노벨과학상은 수상자가 세부 분야에 골고루 분포된 것이 아니라 편중된 경향이 강하다. 전통적인 화학의 분류에 의하여 살펴보면²¹⁾, 화학상의 경우에도 80년대 이후 물리화학, 유기화학, 생화학 분야에서 가장 많은 수상자들이 배출되었다.

그 경향성을 살펴보면 다음과 같은 특징을 보인다. 물리화학 분야는 크게 실험 물리화학과 이론 물리화학분야로 나누어 생각할 수 있는데 두 분야에서 각각 10년에 한 명 정도의 수상자가 배출되고 있다. 실험 물리화학 분야는 특히 고속레이저를 사용한 반응속도 및 반응동역학 분야에서 수상자가 배출되었고, 이론물리화학분야는 화학결합 및 반응 이론연구에서 수상자가 배출 되었다.

유기화학 분야는 80년대 이후 5번의 수상자가 배출되었는데 2000년대에 3번의 수상이 있었다. 수상 분야는 전부 유기합성 분야였고 유기화학반응의 과정을 연구하는 물리유기화학분야의 수상은 없었다.

생화학분야는 가장 수상자를 많이 배출한 분야로서 80년대 이후 9번의 수상자가 배출되었고 2000년대에도 4번의 수상자가 나와 최근 빈도가 더욱 높아지는 경향을 보인다. 이 분야는 생명과학 연구에 화학적 연구방법을 적용하는 분야로서 화학자라기보다 분자생물학과 같은 생명과학 분야연구자들이 수상하는 경우도 있다.

분석화학분야에서도 80년대 이후 5번의 수상자가 배출되었다. 분석법에 관련된 모든 수상 연구는 단백질, 핵산 등 생화학 물질의 구조와 반응과정을 분석할 수 있는 방법의 개발과 관련된 것이었다. 그 이외에 고분자 화학과 재료 나노 화학에 관련된 수상자들이 나왔는데 특히 재료 및 나노 화학은 최근 상당히 주목을 받고 있으면서 많은 학자들이 연구하는 분야기 때문에 앞으로 수상자를 더 많이 배출할 수 있는 분야로 예상된다.

21) 여기서 화학의 분류는 국가과학기술표준분류를 중심으로 노벨상이 많이 수상되었던 분야를 묶어 분류하였다.

80년 이후의 수상에 대하여 각 분야별로 크게 6개의 주제로 나누어 표로 정리하였다. 6개의 주제는 반응속도 및 반응동역학(실험 물리화학), 화학결합과 반응이론연구(이론물리화학), 유기합성, 단백질 등 생화학 반응 및 구조연구와 분석법, 핵산의 분석과 기능, 그리고 고분자, 거대분자 화학/재료화학 등 기타 분야이다. 연구 과정을 단편적인 선형모델로 간단히 나타낼 수는 없지만 수상 연구 각 주제에 대하여 80년대 이전의 연구에서부터 [현상연구 → 이론 및 특성(방법론) → 연구의 확산(합성 및 활용)]의 단계로 진화해 나가는 것으로 분류하였다.

① 반응속도 및 반응동역학 (실험 물리화학) [표 15]

이 분야는 20세기 후반기부터 수상자를 배출하기 시작했지만 80년 이후에는 10년에 한 번 정도 수상자를 배출하였고, 가장 최근에는 고체표면화학반응 연구로 에르틀(Gerhard Ertl)이 2007년에 수상하였다. 이 분야는 수상자들이 반응속도나 반응 동역학연구를 위한 새로운 측정 장치를 고안해서 그 이전에 측정하지 못했던 현상을 측정하고 분석하여 반응 과정을 더욱 깊이 이해하는데 기여 하였다.

화학에서 반응의 이해는 가장 중요한 문제이다. 다양한 종류의 화학반응을 반응 동역학적으로 이해하는 문제는 주요한 문제였고 그 동안 이에 관한 연구 업적으로 수상하는 경우가 대부분이었다. 예컨대, 전하이동 반응과 고체표면 반응에서 수상자가 나왔고, 반응 메커니즘에서 단계를 표시하는 단일단계 반응의 동역학적 연구나 반응과정에서 전이 상태 연구에서도 수상자가 나왔다. 특히 반응 메커니즘이나 반응과정에 관한 연구에서는 매우 짧은 순간에 진행되는 분자의 움직임을 관찰해야 하므로 초고속 레이저를 이용한 실험이 필수적이다. 이런 경우 실험방법의 고안도 중요한 연구 업적이라고 할 수 있다. 그런데 이 분야에서는 연구가 처음 수행된 이후 거의 20년 정도 경과한 후 수상자로 선정되기 때문에 앞으로 20년 내에 수상 가능한 분야를 어느 정도 예측 가능하다.

[표 15] 반응속도 및 반응 동역학

응용 확장	에르틀 (2007) 고체표면 화학 반응 연구 및 산업응용			
특성 이론	타우베 (1954/1983) 무기착물 전하이동 연구	즈웨일 (1980년대/1999) 멤토초 분광학에 의한 화학반응 전이상태 연구		
현상 발견	허시바하, 리, 폴라니 (1967/1986) 단일 단계 화학 반응의 동역학			
80 년 이 전	베르너 (1893/1913) 무기착물 결합구조	노리시, 포터 (1950년대/1967) 빠른 반응 속도 측정법 고안 (이완방법, 섬광법)	아이링 화학반응의 전이 상태 이론 (1930년대)	랭뮤어 (1916/1932) 액체 표면 화학의 발견과 현상 연구
		힌셜우드, 세모노프 (1928-40/1956) 화학 반응의 메커니즘 연구	아레니우스 (1884-87/1903) 화학반응이론	

② 화학결합과 반응이론 연구 [표 16]

이 분야는 20세기 초에 등장한 양자역학과 매우 관련이 깊다. 양자역학이 새로운 원자물리학이라는 분야를 열었고 이를 분자의 화학적 결합을 설명하기 위한 수단으로 활용하기 시작했다. 이 분야에서 이뤄진 1930-40년대 연구업적은 50-60년대에 이르러 수상자를 배출하기 시작했고 80년대 이후에도 3번의 수상연구가 나왔다. 특히 특정 화학반응에 대한 이론적 연구의 업적이나 구조와 반응을 더욱 정확하게 설명할 수 있는 새로운 양자역학적 방법의 업적에 수상이 돌아갔다. 이 분야도 수상연구 발표되고 난 후 거의 20년 정도의 시간이 경과한 후에 수상되었다.

③ 유기합성 [표 17]

유기화학분야는 꾸준히 수상자를 배출하여 온 분야이다. 노벨 화학상이 생긴 이래 10년에 한 번 정도로 꾸준히 수상자가 배출되었다. 그런데 2000년대에 들어와서는 빈도가 늘어나 3번의 수상자가 나왔다. 특히 80년 이후에는 유기화학 중에 유기합성 분야에서만 수상자가 배출되었고, 합성 방법론에서 수상자가 나왔다. 2001년에 수상한 놀스(William S. Knowles), 샤프리스(K. Barry Sharpless), 노요리(Ryoji Noyori)와 2010년 수상한 헵(Richard Fred Heck), 네기시(Ei-ichi Negishi), 스즈키(Akira Suzuki)는 유기합성을 위한 새로운 촉매를 개발한 업적으로 수상하였는데, 유기합성에서 효율적으로 반응을 진행시킬 수 있는 새로운 촉매의 개발은 매우 중요한 연구 분야라고 할 수 있으므로 이 분야에서 계속 수상자가 나올 가능성이 있다. 이 분야도 수상연구가 발표되고 난 후 거의 20년 이상의 시간이 경과한 후에 수상하였다.

[표 16] 화학결합과 반응 이론 연구

응용 확장			
특성 이론	후쿠이, 호프만 (1960년대/1981) <hr/> 화학반응과정에 관한 이론	마커스 (1956-65/1992) <hr/> 전자이동 반응의 이론연구	콘, 포플 (1970/1998) <hr/> 컴퓨터 활용 화학 결합 계산 방법
현상 발견			
80 년 이 전	폴링 (1928-34/1954) <hr/> 양자화학 (Valence Bond Method)	멀리컨 (1930년대/1966) <hr/> 양자화학 (Molecular Orbital Method)	타우베 (1954/1983) <hr/> 무기착물 전자이동 연구

[표 17] 유기합성

응용 확장			놀스, 샤프리스, 노요리 (2001)	그럽스, 슈록, 쇼뱅 (2005)	헵, 네기시, 스즈끼 (2010)
			광학활성촉매개발	유기합성의 복분해 방법 고안	팔라듐 촉매법 개발
특성 이론 (방법론)	메리필드 (1962-5/1984)	코리 (1960년대/1990)			
	고체 매트릭스, 폴리펩티드 합성법	복잡유기 화합물 체계적 전합성			
현상 발견					
80 년 이 전	뒤비노 (1953/1955)	우드워드 (194-50년대/1965)	브라운, 비티히 (1950년대/1979)		
	폴리펩티드 호르몬 합성	복잡천연화합물 전합성	붕소, 인 도입 합성법		

④ 단백질과 핵산 등 생화학 반응 및 구조 연구와 분석법 [표 18, 표 19]

이 분야는 꾸준히 수상자가 배출되었던 분야로, 80년대 이후에는 수상자가 더욱 증가하는 경향을 보인다. 8-90년대에는 평균 5년에 한 번 정도 수상이 되었는데 2000년대에는 4번의 수상자를 배출하였다. 20세기 중반 핵산의 구조가 밝혀진 이후 분자 수준의 생화학 반응연구는 중요한 연구주제가 되어왔다. 대부분의 수상연구는 최근 발전되고 있는 생화학합물 구조 분석법과 연계되어 생화학 반응에 중요한 단백질, 핵산 등 화합물의 구조를 밝히고 작용 메커니즘을 연구한 것들이다. 80년대 이후 분석법에 관한 수상은 모두 복잡한 생화학합물의 관찰과 분석방법 연구로서 현미경, X선 회절, NMR, 질량분석법과 관련된 것이었고, 생화학 연구와 긴밀한 연관 관계가 있다. 생명과학의 많은 주제들은 생체 물질의 구조 및 그것들 사이의 반응을 분자 수준에서 분석하는 것과 연관되어 있기 때문에 이 분야에서 꾸준히 수상자가 배출될 것으로 예상할 수 있다.

⑤ 고분자(거대분자)화학 / 재료화학 등 기타 [표 20]

고분자화학과 거대분자화학은 각각 2000년과 1987년에 수상자가 나왔다. 이 분야는 유기 합성과 관련된 동시에 실용적인 응용과 관련되어 새로운 분야가 항상 열려 있기 때문에 예상하지 못한 연구가 수상할 가능성이 있다. 재료화학은 그 동안 수상자를 배출하지 못한 분야였는데 2011년 준결정연구로 셰시트먼(Daniel Shechtman)이 처음 수상자로 선정되었다. 재료화학과 관련된 나노화학에서는 90년대 풀러렌 연구로 수상자가 배출된 이후 연구가 폭발적으로 축적되고 있어 앞으로 수상가능성이 높은 분야라고 예상할 수 있다. 그리고 가끔 전통적인 화학분야 이외에 사회적으로 높은 주목을 받은 연구가 수상할 가능성도 있다. 1995년 오존층 파괴관련 대기화학 분야에서 수상자가 배출된 것이 한 예라고 할 수 있다.

[표 18] 단백질 등 생화학 반응 및 구조 연구와 분석법

응용 확장					
특성 이론			에이저, 맥키논 (2003) 물, 이론 통로 단백질 구조 연구	치카노베르, 허슈코, 로즈 (2004) 단백질 분해 과정	라마크리쉬난, 요나쓰, 스타이즈 (2009) 라이보솜의 구조와 기능
현상 발견	미헬, 후버, 다이젠호퍼 (1982-5/1988) 광합성 단백질 구조 결정	보이어, 스코우, 위커 (1980-90년대/1997) ATP 합성효소 발견			콘버그 (2006) 진핵생물 유전정보 복사과정
분리 및 분석법	클루그 (1968/1982) 전자현미경에 의한 생분자 구조 결정법	호프트먼, 칼 (1950년대/1985) X선 결정구조법	에른스트 (1970/1991) 고분해능 NMR 고안	펜, 타나카, 뷔트리히 (2002) 질량분석, NMR에 의한 생화학물 구조분석법	시모무라, 찰피, 쨌엔 (2008) 녹색형광 단백질에 의한 현미경 분석법

[표 19] 핵산의 분석 및 기능

응용 확장		멀리스, 스미스 (1983/1993) DNA 복제 및 조작 연구
특성 이론	베르그, 생거, 길버트 (1950-70년대/1980) DNA 배열 결정법, 재조합	
현상 발견		알트만, 체크 (1978-81/1989) RNA 촉매 작용 발견
80 년 이 전	생거 (1943-55/1958) 단백질 2차 배열 결정법	

[표 20] 고분자(거대분자)화학/재료화학/기타

응용 확장	컬, 크로토, 스몰리 (1985/1996) 플러렌 화학	피터스, 크램, 랜 (1960-70년대/1987) 분자인식 거대 분자 합성	히거, 맥더미드, 히테키 (2000) 전도성 고분자 합성 물성연구
특성 이론	크루첸, 몰리나, 롤런드 (1970년대/1995) 오존층 파괴 관련 대기화학		
현상 발견	세시트먼 (2011) 준결정의 발견		
80 년 이 전	플러리 (1948/1974) 고분자 특성 연구		지글리, 나타 (1954/1963) 폴리머 합성법

(3) 징후적 지시자 분석을 통한 미래 유망 연구주제 발굴

노벨 화학상의 경우도 물리학과 마찬가지로 단·중기적(10년 이내)와 장기적으로 구분하여 미래 유망 연구주제에 대하여 전망 하고자 한다.

1901년부터 1972년도까지의 통계에 의하면, 노벨 화학상의 경우 수상연구가 나온 시기부터 수상까지 걸린 평균기간은 15.1년이고 평균 수상자 나이는 53.9세이다.²²⁾ 그러나 최근 30년간의 통계에 따르면, 3개 부문 모두에서 수상자 나이는 더 늦어지고 수상까지의 평균기간도 20년 이상으로 길어지고 있다. 따라서 앞으로 10년 이내에 수상할 가능성이 있는 연구주제와 연구자는 이미 거의 예측이 가능하다. 단·중기적(10년 이내)으로는 징후적 지시자를 통해 수상 가능한 연구주제를 예측할 수 있을 것이다. 화학의 경우 우선 울프상의 화학부문의 전체 수상자 중에 25%정도가 노벨상을 수상하였고 평균 수상격차는 4년이다. 다른 징후적 지시자로서 톰슨로이터에서 매년 노벨상 발표 직전에 발표하는 논문의 인용수에 근거한 수상 예측이 있고, 역시 노벨재단에서 노벨위원회를 중심으로 개최되는 노벨심포지엄의 주제와 초청연사도 좋은 징후적 지시자이다.

단·중기적 예측은 울프상의 화학부문과 톰슨로이터에서 예측된 연구 주제 중 아직 수상하지 않은 주제와 노벨 심포지엄의 주제 중에서 선정하였다. 징후적 지시자들은 현재 어떤 주제들이 각광 받고 있는 주제인지, 비교적 가까운 미래에 노벨상 수상이 기대되는 연구 주제가 무엇이며, 예상되는 수상자가 누구인지를 파악하는 데 있어서도 유용하게 이용될 수 있다. 그리고 단·중기적으로 우리나라의 수상 가능성 있는 연구자를 예측하는 데에도 이러한 연구자들과 수준을 비교하여 예측해 볼 수 있을 것이다.

단·중기적(10년 이내)으로 유망 연구 주제를 크게 다음 7개 분야로 구분하여 경향과 전망을 살펴보겠다. 주요 학자도 함께 표시하였다.

22) Zuckerman, *Scientific Elite: Nobel Laureates in the United States*

◆ 단·중기 전망²³⁾

① 반응속도 및 반응동역학(실험 물리화학)

이 분야는 반응 속도나 동역학을 측정하는 새로운 장치를 고안해서 그 이전에 측정하지 못했던 반응속도와 동역학을 관찰하여 반응의 현상과 특성을 밝혀내는 연구이다. 분자 수준에서 일어나는 현상을 직·간접적으로 관찰하여 더욱 정확한 반응 메커니즘과 반응동역학을 이해하는 연구가 최근에도 계속 중요한 연구 분야로 거론되고 있으며, 선구적인 학자들이 이미 노벨상 후보로 유력하게 거론되고 있다.

-
-
- 단분자 분광학을 활용하여 실시간 분자 수준 반응 연구 울프(08)&노벨심포지엄(NCS01-2/08-138) William Moener
노벨심포지엄(05-131/08-138) Toshio Yanagida & Sunny Xie & Carlos Bustamante
 - 레이저 활용 각종 분자 반응 메커니즘 연구 울프(05)&노벨심포지엄(NCS01-2/05-132) Richard Zare
 - 단백질등 생화학물 전자이동 연구 울프(04) Harry Grey
 - DNA에서 전하이동연구 톰슨로이터(09) Jacqueline Barton & Bernd Giese
 - Nanoscopy 노벨심포지엄(08-138/11-149) Stephan Hell
 - Quantum Dot for Biological Imaging 노벨심포지엄(08-138) Paul Alivisatos

② 화학결합 및 반응 이론연구(이론 물리화학)

이 분야는 화학반응을 이론적으로 예측하는 방법을 제안하거나 복잡한 분자구조와 반응과정을 양자역학적 또는 통계역학적으로 예측하는 분야로서, 새로운 이론을 제안하거나 컴퓨터를 활용한 계산 방법 등이 중요한 연구 분야이다.

-
-
- 화학반응과정에서 에너지 전이와 동역학적 선택성 연구 울프(88)&노벨심포지엄(96-101) Joshua Jortner
울프(88)&노벨심포지엄(00-117) Raphael Levine
울프(11) Stuart Rice

23) 노벨심포지엄은 (개최 연도-심포지엄 번호)를 의미.

③ 유기화학

이 분야에서 유망한 연구는 천연에서 얻은 복잡한 유기화합물을 체계적으로 합성하는 전합성 연구나 특정한 화학결합을 선택적으로 반응시키는 새로운 합성방법을 고안하는 연구 등이다.

-
- | | |
|--------------------------------------|--|
| · 천연유기화합물의 합성, 입체화학, 반응 메커니즘 연구 | 울프(86) Albert Eschenmoser
울프(89) Duilio Arigoni & Alan Battersby
톰슨로이터(02) K.C. Nicolaou
톰슨로이터(06) David Evans & Steven Ley |
| · 고전적 합성 방법으로 달성하기 힘든 새로운 유기화학반응 개발 | 울프(94)&노벨심포지엄(95-97/05-132) Richard Lerner
울프(94)&노벨심포지엄(95-97/NCS01-2) Peter Schultz
톰슨로이터(07) Dieter Seebach |
| · 생물학적, 의학적 주요 화합물 합성을 위한 새로운 합성법 개발 | 울프(95) Gilbert Stork
울프(95) & 톰슨로이터(07) Samuel Danishefsky
톰슨로이터(09) Benjamin List |
| · 생물유기화학 및 화학생물학 | 톰슨로이터(06) Stewart Schreiber
톰슨로이터(07) Berry Trost |

④ 분석화학

이 분야는 새로운 분리 또는 분석 방법 개발에 수상되었는데, 최근에는 특히 복잡한 생화합물의 관찰과 분석방법 연구로서 현미경, X선 회절, NMR, 질량분석법, 분광분석법의 새로운 발전 및 전혀 새로운 개념의 분석법의 고안이 중요해지고 있다.

-
- | | |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| · 주사전기화학 현미경의 개발과 응용 | 울프(08) & 톰슨로이터(11) Allen Bard |
| · EPR/NMR의 스핀라벨 기술에의 한 복잡한 화합물의 구조연구 | 울프(83) Harden McConnell |

⑤ 무기화학

이 분야는 83년 토브(Henry Taube) 이후 수상자가 배출되지 않고 있는 분야이지만 생화학분야 또는 재료화학과 관련되는 연구는 계속 주목을 받고 있다.

-
- 다양한 결합의 금속원자 클러스터에 기초한 전이금속화학 연구 울프(00) Frank Cotton
 - 생물무기화학의 선구적 연구 톰슨로이터(10) Stephan Lippard
 - 전이유기금속의 합성과 응용 톰슨로이터(06) Tobin Marks

⑥ 생화학

이 분야에서는 최근 발전되고 있는 생화학물의 구조 분석법과 연계되어 생화학 반응에 중요한 단백질, 핵산 등의 화합물 구조를 밝히고, 작용 메커니즘을 규명하는 연구가 중요하다. 최근 더욱 수상자가 늘어나고 있고 앞으로 당분간 이러한 경향은 지속될 것으로 예상된다.

-
- NMR을 사용한 RNA와 단백질의 구조결정 톰슨로이터(02) Adriaan Box
 - 광합성관련 생화학분자의 구조와 반응 연구 울프(06) George Feher
 - Systems Biology 노벨심포지엄(09-146)
Marc Vidal & Bernhard Palsson
 - Chaperonin에 의한 단백질 접힘 연구 노벨심포지엄(NCS01-2/05-132) Arthur Horwich
래스커(11) & 톰슨로이터(09)

⑦ 고분자화학(거대분자), 재료화학(나노화학), 환경화학 등

이 분야는 새로운 구조와 성질을 가진 실용적인 고분자 화합물을 합성하고 그것의 특성을 연구하는 분야이다. 환경과 에너지 관련 연구는 사회적 관심을 받는 연구 주제이기도 하다.

-
- | | |
|--|--|
| · 나노 자기 조립 | 노벨심포지엄(NCS01-2)&톰슨로이터(02) Fraser Stoddart
톰슨로이터(02) Seiji Shinkai & George Whiteside
노벨심포지엄(05-132) Julius Rebek |
| · 나노와이어와 나노물질의 응용 | 톰슨로이터(08) Charles Lieber |
| · 유기 고분자 재료의 합성과 응용 | 울프(11) & 톰슨로이터(08) Krzysztof Matyjaszewski |
| · OLED와 유기 태양전지의 기초이론 | 울프(11) Ching Tang |
| · 태양전지재료 연구(다공성 금속-유기 골격체의 합성과 응용) | 톰슨로이터(09)&노벨심포지엄(NJS91-2) Michael Gratzel
톰슨로이터(10) Susumu Kitagawa & Omar Yaghi |
| · 덴드리머의 합성과 응용 | 톰슨로이터(11) Jean Frechet & Donald Tomalia & Fritz Vogtle |
| · 지구상 생명의 근원에 관한 화학 | 노벨심포지엄(02) |
| · Cosmic Chemistry와 Molecular Astrophysics | 노벨심포지엄(06-133) |

장기적인 주제를 예측하는 것으로서는 최근 교육과학기술부에서 시행한 “기초 과학연구 100대 유망 연구영역 선정을 위한 기획연구”²⁴⁾와 *Scientific American* 2011년 10월호에 나온 “10 Unsolved Mysteries in Chemistry”²⁵⁾, 2009년 *Nature Chemistry* 창간호에 발표된 “The Future of Chemistry”²⁶⁾, 2011년 화학의해를 맞이하여 *Nature* 2011년 1월 6일호에 나온 “What lies ahead”²⁷⁾의 내용을 정리하였다. 또한 저자

24) 백동열 등, 『기초과학연구 100대 미래유망 분야 선정을 위한 기획 연구』; 교육과학기술부, 『기초연구 100대 미래유망분야 선정결과 및 활용방안(안)』 참조.

25) Philip Ball, “10 Unsolved Mysteries in Chemistry,” *Scientific American* 305:4 (2011), pp. 48-53.

26) Ryoji Noyori etc., “The Future of Chemistry,” *Nature Chemistry* 1 (2009. 4), pp. 5-15.

27) Paul Wender etc., “What Lies Ahead,” *Nature* 461 (2011), pp. 23-25.

John R. Vocca가 노벨 수상자 40여명을 비롯하여 60여명을 인터뷰하여 저술한 "The world's 20 greatest unsolved problem"에 제안한 주제 중에 화학에 관련된 4 주제를 정리 하였다.

◆ 장기 전망

기초연구 100대 유망 연구 화학/화공/재료/환경 분야

(기초연구사업추진위원회, 교육과학기술부 2011.5)

여기서 언급된 연구주제는 논문분석과 전문가 추천을 거쳐 1차적으로 선정된 주제를 대상으로 2차로 전문가의 설문조사를 거친 뒤, 최종적으로 산학연 전문가 20인이 선정한 것이다. 주로 에너지, 소재, 자원, 환경, 의약 관련 주제로서 기초 연구보다 응용에 초점이 맞추어져 있기 때문에 이러한 응용을 달성하기 위한 기초적인 연구 주제를 발굴해야 할 것이다.

- 1) 새로운 에너지 생산, 저장 소재 개발
- 2) 차세대 반도체, 디스플레이 소재 개발
- 3) 나노소재 합성 및 응용
- 4) 전기화학 기술의 응용
- 5) 이산화탄소의 고정과 전환
- 6) 지능형생체소재
- 7) 바이오매스의 전환 및 정제
- 8) 의약품 소재의 추출 및 합성
- 9) 생체물질/유기분자 자기 조립
- 10) 자연모사 소재 및 응용

화학의 아직 풀리지 않는 10개 연구주제

(*Scientific American* 2011년 10월호)

- 생명은 어떻게 시작되었는가? · 분자수준에서 복잡한 화합물이 만들어지고, 에너지 대사과정과 replicate 과정이 어떻게 만들어졌는지에 대한 문제이다. 이에 관한 몇 가지 가설이 있다. 1) self replicating polymer on clay as catalyst 2) Deep sea hydrothermal vent의 에너지에 의한 복잡한 화합물 생성 3) RNA world - enzyme 등
- NASA는 물이 존재하는 환경을 생명체가 생겨날 수 있는 전제조건으로 생각해 왔지만 현재로서는 확신하지 못하는 상태이다. 오늘날에는 액체 암모니아, formamide, 액체메탄이나 supercritical hydrogen과 같은 oily solvent도 가능할지에 관한 물음, 즉 생명체는 오직 단백질, 핵산에 의해서만 가능할 것인가, 아니면 완전히 다른 즉 이미 핵산이 없는 replication 가능한 인공적 화합체와 같이 완전히 새로운 생명이 가능할 것인가 하는 물음이 중요하게 제기되고 있다.
- 분자는 어떻게 형성되는가? · 1920년대 이후 화학결합에 관한 이론으로는 Heitler-London 양자역학적 결합모형, Pauling의 VB theory, Mulliken-Hund MO theory 등이 가장 널리 받아들여져 왔다. 그러나 항상 가정과 근사법의 사용이라는 문제가 있었다. 결합은 항상 전자의 dynamic한 상태인데 static하게 모델을 만들고 가장 중요하다는 요소만 고려하고 나머지는 무시하는 근사이기에 모든 결합을 온전하게 설명하는 모델은 아직 없다. 최근 computer simulation으로 가능한 정확하게 재현하려고 하지만 전자수가 많은 복잡한 생화학분자는 슈퍼컴퓨터를 사용하여도 쉽게 해결되지 않을 것이다.
- 환경이 유전자에 어떻게 영향을 미치는가? · 줄기세포는 필요에 따라 특정한 염기서열을 활성화시켜 특정 기관의 세포로 발달할 수 있는 능력을 가지고 있다. 그러나 빈틈없이 꽉 채워진 줄기세포내 염색체에서 필요에 따라 특정 시간에 특정부위가 어떻게 활성화되는지를 화학적으로 밝히는 것은 매우 어려운 과제이다. 예를 들어, 느슨한 열린 구조를 가지고 있는 배아줄기세포 내의 chromatin은 특정 유전자가 비활성화됨에 따라 덩어리지면서 조직화된다. 즉 chromatin이 세포의 상태를 안정화한다. 이러한 Chromatin sculpting은 DNA와 histone의 양쪽에 화학적 변화를 만드는데, 여기에 특정 유전자자가 비활성화 상태인지 활성화 상태인지를 cellular machinery에게 알려주는 표지인 작은 분자가 붙는다. 이 표지는 유전자가 가지고 있는 정보를 바꾸지는 않기에 후성유전학적 표지라고 부른다. 즉 세포의 분화에는

유전적 정보와는 다른 차원의 화학적 언어인 후성유전학적 언어가 필요하다. 병의 증상이 후성유전학의 경로를 통하여 작동하는 환경적 요인에 의하여 나타나기도 하므로 후성유전학적 원리를 밝히는 것은 DNA의 작동원리를 밝히는 것만큼 세포내의 화학을 이해하는 데 중요할 수 있다.

· 뇌는 어떻게 생각하고 기억을 만들어내는가?

· 뇌는 일종의 화학적 컴퓨터이다. 따라서 기억과 망각의 메커니즘은 화학적 관점에서 연구될 수 있다. 현재까지 알려진 바로 단순한 기억은 신경전달물질 분자의 양으로 조절되며, 서술 기억(declarative memory)에는 NMDA receptor라는 단백질이 주요한 역할을 한다. 또한 기억에 대한 Prion 단백질의 역할도 최근 연구되고 있다. 뇌 화학에서 매우 중요한 것은 어떻게 기억을 기록하며, 기록되어 있는 메모리를 어떻게 기억해내는가를 화학적으로 알아내고 더 나아가 메모리를 증진시키는 화합물의 개발하는 것이다.

· 세상에는 얼마나 많은 원소들이 존재하는가?

· 입자 충돌장치에서 만들어지는 Superheavy element의 성질에 관한 연구는 이러한 원소들이 우리가 알고 있는 주기율표의 경향을 만족시키는지를 확인하는 데 주로 초점이 맞춰져 있다. 최근까지의 연구결과는 일부는 그렇고 다른 일부는 그렇지 않다는 것이다. Superheavy element의 내부전자는 핵 가까이에 있게 되고 따라서 빛의 속도에 가깝게 움직이기 때문에 특수상대성원리에 의하여 전자의 질량이 커져서 혼란이 생기게 된다. 양성자와 중성자 관계에 magic number가 있기에 안정한 superheavy element가 존재할 가능성이 예측되고 있다. 그러면 얼마까지 큰 것이 가능한가에 대한 예측을 해볼 수 있는데, 상대성이론에 근거한 간단한 추정에서 따르면 137이 최대이지만 더 복잡한 방법에 의한 추정에서 따르면 한계가 없다는 예상이 나오기도 한다. 추후로 계속된 실험과 이론이 필요한 과제이다.

· 탄소를 이용하여 컴퓨터를 만들 수 있는가?

· 더 빠른 차세대 컴퓨터를 위한 재료로 Graphene을 이용할 수 있다는 가능성이 제기되고 있다. 그러나 90년대 이후 차세대 컴퓨터 소재로 Buckyball, carbon nanotube등이 거론된 바 있으나 몇 가지 문제로 인해 아직까지 전자회로를 만드는 단계에 이르지 못하고 있다. Nanotube를 펴서 판으로 만든 것과 같은 graphene으로는 interconnection이 더 수월하여 가능성이 있으나 최근 연구 결과들은 과장되어 있는 면이 있다. 유기합성과 같은 방식의 bottom-up 합성으로 polyaromatic 분자를 붙여 interconnection을 만드는 방안 등의 다양한 가능성의 연구가 필요하다.

더 효율적으로 이용할 수 있을까?

이용하기 위해서는 아직 많은 연구가 필요하다. 태양에너지 연구의 최종적 목적은 태양광을 이용한 경제적 연료를 만드는 것이다. 연구되는 것으로 태양에너지를 사용하여 물을 수소로 분해하는 것이다. 최근 연구로 silicon nanowire와 cobalt based photocatalyst를 이용한 것이 있으나 아직 이러한 반응을 진행시키는 이상적인 값싼 촉매가 발명되지 않았다. 게다가 아직도 우리는 광합성의 4개 망간원자와 한 개의 칼슘원자로 구성된 천연 촉매작용을 완전히 이해하지 못하고 있다. 자연계에서의 경우 광합성과정에서 관여하는 유기화합물이 빨리 깨지지만 금방 새것으로 교체되어 지속적으로 광합성 가능하나 인공적으로 모사한 화학반응계에서는 불가능하다. 즉 천연광합성 과정의 이해와 이를 인공적으로 재현하는 연구가 필요하다.

바이오연료를 만드는 가장 좋은 방법은 무엇인가?

· 식물이 광합성을 통해 저장한 에너지를 적절한 촉매를 이용하여 효율적인 연료 바꿀 수 있는 연구가 필요하다. 현재 재배되는 식량을 에너지 연료로 바꾸는 것은 매우 비효율적이라고 할 수 있다. 미국에는 현재 교통수단에 사용되는 휘발유와 디젤유 연간 소모량의 1/3을 공급할 수 있는 양의 농산물과 나무 잔해가 있는데 이를 경제적인 연료로 바꾸는 것이 해결방안이 될 수 있다. 이들은 lignin과 cellulose같은 단단한 결합을 가진 폴리머이고, 이를 효과적으로 분해시켜 연료로 만들기 위한 경제적인 방법을 고안하는 게 필요하다. 최근 nickel-based catalyst가 고안되었으나 더욱 경제적인 촉매의 개발이 필요하고, 나무나 풀과 같은 raw material의 impurity문제를 해결하는 것도 또 다른 큰 문제 중 하나이다. 결국 문제는 적합한 촉매를 발견하는 것이다.

약을 만드는 새로운 방법을 고안할 수 있는가?

· 항생제에 대한 병원균의 내성이 증가함에 따라 새로운 항생제 개발이 요구되고 있다. 90년대에 combinational chemistry가 하나의 방안으로 제안되었지만 당시에는 별로 성공하지 못했다. 그러나 최근 더 넓은 범위에서 다양한 작용이 가능한 분자들의 라이브러리가 만들어지고 적은 양으로도 그것의 작용여부를 알아낼 수 있는 좋은 방법이 개발됨으로써 성공 가능성이 커졌다.

· 예를 들면, DNA-based barcode를 이용하여 특정 단백질이 약으로 작동하는지 쉽게 알아내면서 동시에 그것을 추출할 수 있는 방법이 있다. 다른 예로는 시험관에서 후보 물질의 라이브러리를 지속적으로 개선하는 방법으로, DNA를 이용하여 가능성 있는 단백질 약을 만들고 쉽게 변이가 일어나도록 복제를 유도하여 성공적인 변형을 만들어낸다. 이 과정을 통해 복제와 선택의 과정을 되풀이함으로써 좋은 약을 찾아낼 수 있다. 또 다른 예로 DNA를 프로그래밍함으로써 자연에서처럼 DNA를 이용하여 스스로 조립

되는 단백질 약을 만들어낼 수도 있을 것이다.

신체의 화학적 변화를 지속적으로 모니터링할 수 있을까?

·화학자는 분자를 만드는 것 뿐 아니라 분자들과 communication 하는 데에도 관심이 있다. 말하자면, 화학자들은 살아있는 세포에서 나온 물질과 컴퓨터 혹은 광섬유를 접속함으로써 화학을 정보기술로 만들고 싶어 하는 것이다. 이미 혈액 내 당 농도를 측정함으로써 당뇨병을 모니터링할 수 있는 바이오센서나 공해물질을 탐지할 수 있는 화학적 센서 등이 이미 개발되어 있으나 이와 유사한 더 다양한 화학적 시스템을 개발할 필요가 있다. 생의학 분야에서는 발병 전에 병의 발병 가능성을 알 수 있는 표지를 찾아내고, 이러한 표지를 실시간으로 모니터링할 수 있는 센서를 개발하여 발병을 예방할 수 있는 방법이 개발될 필요가 있다. 또한 매우 적은양의 표지라도 감지할 수 있고 지속적으로 모니터링할 수 있는 방법의 개발이 필요하다.

화학의 미래 (*Nature Chemistry*, 2009, vol. 1, p. 5)

새로운 합성방법 (Ryoji Noyori, Nagoya Univ)	·경제적, 에너지효율적, 환경친화적 촉매의 개발등을 포함하여 수득율을 100%에 가깝고, 선택적이며, 부산물이 적은 합성법의 개발
태양에너지의 효율적 이용연구 (Harry Gray, Caltech)	·효율적 태양연료전지의 개발에 필요한 다양한 기본적인 화학적 문제를 풀 수 있는 연구
이론과 실험의 조화 (Mark Johnson, Yale Univ.)	·실험의 결과를 설명할 수 있고 역으로 실험 결과를 예측할 수 있는 양자역학적, 통계역학적 또는 새로운 종류의 이론 연구
생명 현상의 화학적 연구 (Barbara Imperiali, MIT)	·생명체를 유지하는데 다양하고 복잡하게 연계된 생화학적 반응 경로를 이해하기 위한 화학적 연구
정밀하고 정확한 분석장비 개발 (Gary Hieftje, Indiana Univ)	·기존의 방법을 개량하거나 완전히 새로운 원리에 의하여 더 적은 양의 시료와 낮은 농도, 그리고 분석과정에서 나노기술을 응용하는 정밀하고 정확한 분석 방법 연구
그린 에너지 관련 연구 (James Clark, Univ. of New York)	·바이오매스, 폐기전자소자 등 폐기물로부터 유용한 자원 추출하고 자원의 효율적 활용과 환경친화적인 화학공정 연구

- (Achim Muller, Univ. of Bielefeld) 성 등 새로운 종류의 무기화합물 연구
 초분자 화학 · 나노기술과 접목하여 새로운 구조와 기능을 가진 초분자의
 (Fraser Stoddart, Northwestern Univ) 합성과 물성 연구

미래에 일어날 화학 (*Nature* 2011, vol. 469, p.23)

- 모든 현상에 대한 분자수준의 이해 연구 (Paul Wender, Stanford Univ)
- 값싸고 풍부한 원소로부터 유용한 물질을 효율적으로 만들 수 있는 연구 (Christopher Cummins, MIT)
- 효율적인 자원 활용의 그린 화학 (Martyn Poliakoff, Univ. of Nottingham)
- 자연에서 생명체가 수행하는 고분자 합성의 모사 (Laura Kiessling, Univ. of Wisconsin-Madison)
- 자기조립적 합성 방법 연구 (Bert" Meijer, Eindhoven Univ of Technology)
- 효율적인 광합성 방법 연구 (Paul Alivisatos, Lawrence Berkeley NL)
- 선택적 화학반응 연구 (Karen Wooley, Texas A&M Univ)
- 태양에너지를 효율적으로 이용하는 연구
 (David King, Smith School of Enterprise and the Environment, Oxford, UK)
- 지속가능한 환경을 유지하기 위한 다양한 화학반응 연구 (Joanna Aizenberg, Harvard Univ)
- 에너지를 효율적으로 변환시키는 화학반응 연구 (Graham Fleming, Univ of California Berkeley)

"The world's 20 greatest unsolved problem" 화학 부문

(John R. Vocca, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA 2005)

노벨상 수상자 40여명을 포함한 60여명의 세계적으로 저명한 학자들을 인터뷰할 결과를 저자가 정리한 것으로 이 책은 물리학, 화학, 생명과학, 지구과학의 기초 과학 분야의 중요하지만 아직 해결하지 못한 20개의 문제를 자세히 소개하고 있다. 그 중 화학관련 주제는 4개이다.

-
- 1) How Microscopic Atomic Forces Produce Various Macroscopic Behaviors
 - 2) The Fabrication and Manipulation of Carbon-based Structures(Fullerenes)
 - 3) Free Energy : Have Advanced Civilizations Harnessed Free Energy?
 - 4) Nuclear Fusion and Waste

이상에서 제안된 연구 주제를 보면 10년 이후의 장기적인 미래를 위하여 연구해야하는 주제이기에 연구주제의 구체성은 부족하지만 궁극적으로 무엇을 위한 연구인지 목적은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 분자 수준에서 다양한 화학반응의 이해
- 원하는 성능과 구조의 화합물의 효율적 합성방법
- 에너지의 효율적 생산과 저장, 활용을 위한 화학
- 환경친화적인 화학반응 고안
- 복잡한 생체 화학반응의 근본적 이해를 통하여 의약품 개발

라. 노벨 생리의학상을 중심으로 본 우수 주제

알프레드 노벨은 19세기에 생겨난 실험생리학에 상당한 관심을 가지고 있었다. 실험생리학이란 기존의 임상의학 전통에서 벗어나 의학을 과학화하려는 시도에서 생겨난 분야라고 할 수 있다. 실험생리학자들은 생명현상을 물리화학적 관점에서 이해하고 이에 기초하여 질병에 관한 보편적인 이론을 확립하고자 했다. 대표적인 인물들로는 질병의 세균설을 확립한 파스퇴르(Louis Pasteur)와 코흐(Robert Koch) 등을 들 수 있다. 특히 노벨은 광견병 백신 개발에 성공한 파스퇴르에 높은 관심을 보였다. 세균설의 성공에 강한 인상을 받은 Nobel은 실험생리학이 의학에 중요한 기여를 할 것이라고 기대했고, 이를 장려하려는 목적에서 노벨 생리의학상을 설립했다. 노벨은 스톡홀름의 카롤린스카 의학 연구소(Karolinska Institute)로 하여금 생리의학상을 관장하도록 하고 인간 건강에 대한 기초적인 연구에만 상을 수여해야 하다고 결정했다. 따라서 노벨 생리의학상은 의학과 직접적으로 연관이 있거나 의학에 응용 가능한 연구에 수상이 주어지므로 다양한 생명과학 분과 중 특정 분야만을 선호하는 경향이 있다.

(1) 노벨 생리의학상의 일반적 특징

시기별, 분야별로 볼 때, 노벨 생리의학상의 연구 주제들은 크게 1950년을 기준으로 두 시기로 구분할 수 있다. 1901년에서 1950년까지는 특정 분야에 대한 선호가 특히 두드러져서 2/3 이상이 신경생리학(17개)과 세균학(18개)에 집중되었다. 신경생리학은 19세기부터 실험생리학자들의 주된 연구 분야였다. 이 시기에는 신경계의 구조와 기능을 규명하는 연구가 활발했다. 19세기 말과 20세기 초 신경생리학에 기초를 놓은 대부분의 연구자들이 노벨상을 수상했는데, 대표적인 인물로는 염색법 개발로 신경계 구조 연구에 기초를 놓은 카할(Santiago Ramón Cajal)과 골지(Camillo Golgi)(1906), 뉴런이론을 정립한 셰링턴(Charles Scott Sherrington)과 에이드리언(Edgar Adrian)(1932), 미세 말초신경과 신

경세포 연구에 중요한 공헌을 한 데일(Henry Hallett Dale)과 뢰비(Otto Loewi)(1936), 어랜저(Joseph Erlanger)와 개서(Herbert S. Gasser)(1944) 등을 꼽을 수 있다.

신경생리학과 더불어 세균(미생물)학도 매우 많은 수상자를 배출했다. 세균학은 면역학의 일부로도 볼 수 있지만 1950년 이전에는 면역계에 대한 연구보다는 특정 질병과 연관된 병원균의 발견 및 그에 대한 치료법 개발에 더 집중된 연구가 이뤄졌다고 볼 수 있다. 세균설에 기초를 놓은 인물들 중 1896년에 사망하여 노벨상을 받을 기회가 없었던 파스퇴르를 제외하고는 대부분이 노벨상을 수상했다. 1901년의 첫 번째 노벨 생리의학상은 디프테리아 치료법을 개발한 폰 베링(Emil von Behring)에게 돌아갔고, 이듬해에는 말라리아 침투 경로를 규명한 로스(Ronald Ross)가 수상했다. 세균설을 확립한 코흐는 결핵균 발견의 업적으로 1905년에 수상했고, 코흐의 제자인 에를리히(Paul Ehrlich)와 파스퇴르의 제자인 메치니코프(Elie Metchnikoff)는 면역계에 관한 연구 업적으로 1908년에 나란히 수상했다. 이후에도 과민증을 연구한 리셰(Jean-Francois Richet)(1914), 발진티푸스를 연구한 니콜(Charles Nicolle)(1928), 황열병을 연구한 타일러(Max Theiller)(1951) 등 많은 연구자들이 세균학 및 면역에 관한 연구로 노벨 생리의학상을 수상했다.

1950년 이후에는 새로운 분야가 노벨 생리의학상으로부터 집중적인 선택을 받았다. 단백질 효소와 핵산의 물리화학적 구조 및 활성을 탐구하는 분야인 생화학 그리고 생화학과 연결되어 새로운 방향으로 나아간 면역학이 바로 그것이다. 사실 효소와 관련된 물질대사는 1950년대 이전에도 여러 개의 노벨상을 배출한 분야였다. 단백질과 핵산에 대한 기초적인 연구는 1910년에 노벨 생리의학상을 받은 코셀(Albrecht Kossel)에 의해 이뤄진 바 있고, 이후 당 발효 효소를 연구한 하든(Arthur Harden)과 폰 오일러켈핀(von Euler-Chelpin)(1929, 화학상), 호흡효소인 시토크롬의 기능을 규명한 바르부르크(Otto Heinrich Warburg)(1931), 효소 결정화 연구를 한 섬너(James Batcheller Sumner)와 노스롭(John Howard Northrop)(1946, 화학상) 등이 효소 연구의 선구자라고 할 수 있다. 1940년대 이후, 효소와 물질대사 분야는 다수의 노벨 생리의학상 수상자를 배출했다. 대표적인 인물로는 글리코젠 연구로 유명한 코리 부부(Carol and

Gerty Cori)(1947), TCA 회로를 발견한 크랩스(Hans Krebs)와 리프먼(Fritz Lipmann)(1953) 등이 있다.

효소와 물질대사보다 더 많은 수상자를 배출한 분야는 DNA와 연관된 분자 유전학이다. 1930-40년대 이후, 많은 물리학자와 화학자가 유전학 분야에 뛰어들었고, 이들은 핵산의 구조와 기능을 규명하는 데 중요한 공헌을 했다. 대표적인 인물로는 라이너스 폴링(Linus Pauling), 생어(Frederick Sanger), 루리아(Salvador Luria), 테이텀(Edward Tatum), 델브뤽(Max Delbruck), 크릭(Francis Crick) 등이 있으며 이들은 모두 노벨상을 수상했다. 특히 DNA가 유전정보를 담은 물질임이 밝혀지고 왓슨(James Watson)과 크릭에 의해 DNA의 구조가 규명된 1950년대 중반 이후, DNA와 관련된 연구에서만 무려 노벨 생리의학상 26개(노벨 화학상은 8개)가 배출되었다. DNA 연구로 노벨 생리의학상을 수상한 대표적인 인물로는 물질대사 조절 유전자 연구를 한 비들(George Beadle)과 테이텀(1958), RNA와 DNA의 생물학적 합성 기작을 연구한 오초아(Severo Ochoa)와 콘버그(Arthur Kornberg)(1959), DNA의 구조 및 기능을 규명한 왓슨과 크릭(1962), 박테리아 효소의 유전적 조절을 연구한 모노(Jacques Monod)와 자콥(Francois Jacob)(1965) 등이 있다.

1950년대 이후, 면역학 분야는 세균학에서 벗어나 새로운 방향으로 나아가기 시작했다. 버넷(John Bennet)과 메다워(Peter Medawar)가 후천성 면역내성을 발견한 공로로 1960년에 노벨 생리의학상을 수상한 이후, 면역학 분야는 생화학과 DNA와 연결되어 새로운 방향, 즉 인체의 면역계 자체에 관한 연구로 나아가기 시작했다. 대표적인 인물로는 항체의 화학적 구조를 발견한 로드니 포터(Rodney Porter)와 에들먼(Gerald Edelman)(1972), 면역반응을 조절하는 세포 표면의 유전적 구조체를 발견한 베나세라프(Baruj Benacerraf), 장 도세(Jean Dausset), 스넬(George D. Snell)(1980), 단일클론항체를 개발한 예르네(Niel Jerne), 켈러(Gorges Kohler), 밀스타인(Cesar Milstein)(1984), 항체 생성의 유전학적 원리를 규명한 도네가와 스스무(Tonegawa Susumu)(1987), 세포성 면역방어체계의 특이성에 관한 발견을 한 도허티(Peter Doherty)와 징커나겔(Rolf Zinkernagel)(1996) 등이 있다. 물론 새로운 병원체의 발견이나 치료법 개발 역시 여전히 노벨 생리의학상의 관심을 받고 있다. 세균학과 면역학은 의학과 관련된 연구라는 노

벨 생리의학상의 목적과 가장 직접적으로 연결되는 분야인 만큼 1901년 이후 현재까지 꾸준히 많은 수상자를 배출하고 있다.

마지막으로, 1990년 이후 세포생리학 분야에서 다수의 노벨 생리의학상 수상자가 배출되었다. 특히, 세포 내 단백질 조절 및 세포의 life cycle에 관한 연구에서만 1990년 이후 6개의 노벨 생리의학상이 배출됐다. 주요 연구 주제로는 세포 내 단백질 조절 원리 규명(1992, Fischer & Krebs), 세포 내 신호전달 체계에서 G-단백질의 역할 규명(1994, Gilman & Rodbell), 세포주기의 핵심 조절 인자 발견(2001, Hartwell & Hunt&Nurse), 텔로미어와 텔로머레이즈의 기능 규명(2009, Blackburn & Greider & Szostak) 등이 있다. 앞으로도 이 분야에서 다수의 노벨상이 배출될 것으로 기대된다.

(2) 1980년대 이후 노벨위원회가 주목한 생리학 연구주제 분류

1980년대 이후 다수의 노벨 생리의학상이 면역학, 세포생리학, 유전(자) 조절 분야에서 배출된 것으로 보아 노벨위원회가 이들 분야에 특히 관심을 가지고 있음을 알 수 있다. 노벨위원회가 관심을 가지는 분야는 향후 노벨상이 배출될 가능성이 매우 높으며, 잠재적인 유망 연구주제가 존재할 가능성 또한 높으므로 주목할 필요가 있다. 따라서 이들 분야에서 노벨상을 수상한 연구주제들을 유형에 따라 분류하는 것은 이들 분야의 현재 발전 수준을 가늠하고, 향후 나아갈 대강의 방향을 예측하는 데 도움이 될 것이다.

분류 방식은 다음과 같다. 노벨 생리의학상을 수상한 연구주제를 우선, 면역학, 세포생리학, 유전(자) 조절 분야 그리고 기타분야로 분류하고, 각각의 분야에 속한 연구주제들을 주제 유형에 따라 분류하였다. 분류표에는 1980년 이후의 노벨 생리의학상 수상 연구주제 이외에도, 이들 연구의 토대가 된 80년대 이전의 연구와 아직 노벨상을 받지 못한 연구주제들 이미 이들 분야의 중요한 연구 성과로 인정받아 향후 수상이 유력시되는 연구주제들을 함께 포함시켰다. (80년대 이전 연구와 향후 수상이 유력한 연구주제는 가로 점선으로 구분했다.) 이를 통해 각 분야가 발전해 온 역사와 향후 발전 방향의 윤곽이 좀 더 뚜렷

이 드러나게 될 것이다. 각 분야의 개략적인 특징은 다음과 같다.

① 면역학 분야 [표 21]

면역학은 노벨상이 제정된 1901년 이후 노벨위원회의 꾸준한 관심을 받아 온 분야이다. 노벨 생리의학상이 제정된 목적이 의학과 관련한 생물학 연구를 장려하는 것임을 상기해 볼 때 질병에 대한 인체의 방어기전을 연구하는 면역학 분야가 노벨위원회의 높은 관심을 받아 온 것은 자연스러운 일이라 할 수 있다. 20세기 초에는 주로 병원체 발견과 그에 대한 백신 개발이 주요한 연구 주제였으나 20세기 후반으로 오면서 면역계 방어시스템의 메커니즘을 규명하는 것이 주요한 연구과제가 되었다.

면역학은 '체액성 면역'과 '세포성 면역'의 하위 분야로 구분할 수 있다. 20세기 전반기에는 주로 항체와 관련된 체액성 면역에 대한 연구가 두드러졌으나, 20세기 후반, 특히 1990년대 이후로는 T세포와 관련된 세포성 면역에 대한 연구가 더욱 주목받고 있다.

특히 주제 유형의 측면에서 볼 때, 체액성 면역 분야는 20세기 전반기에 현상발견과 특성연구 단계를 거쳐 1980년대에 이르러서는 응용 및 확장 단계에 진입했다. 특히 유전(자) 조절 분야와 연결된 연구주제가 주목 받았는데, 사실 유전(자) 조절 분야와의 연결은 비단 면역학 분야 뿐 아니라 다른 대부분의 분야에서도 발견할 수 있는 20세기 중반 이후의 중요한 경향이라고 할 수 있다. 이와 달리, 세포성 면역 분야는 20세기 전반기에 별다른 연구가 이뤄지지 못하다가 20세기 중후반 이후에야 본격적인 연구가 진행되어 현재 특성연구 단계에 있음을 확인할 수 있다. 이는 아직 규명되어야 할 세포성 면역 조절 메커니즘이 남아있고, 향후 조직이식과 같은 응용 등으로 나아갈 가능성이 열려 있음을 의미한다고 볼 수 있다.

[표 21] 면역학

		머리&토마스(1950년대/1990) 생체기관과 세포 이식에 관한 발견	앨리언&히칭스(1950년대/1988) 세포 특성 약물 발견
		보이틀러&호프만 (2011) 선천성 면역의 활성화에 관련된 발견	슈타인만 (2011) 돌기세포 발견 및 후천성 면역에서 그것의 역할에 관한 발견
응용 확장	매글린톡(1940년대/1983) 전이성 유전인자 발견	도네가와 스스무 (1970년대/1987) 항체 생성의 유전학적 원리	도허티&징커나겔(1970년대/1996) 세포성 면역방어체계의 특이성에 관한 발견
		예르네&퀸라&밀스타인(1970년대/1984) 체액성 면역체계의 조절 이론 단일클론항체 생산 원리	베나세라프&도세&스넬(1960년대/1980) 면역반응을 조절하는 세포 표면의 유전적 구조체 발견
80 년 이 전	특성 이론	버넷 클론선택이론	버넷&메다워 (194-50년대/1960) 후천성 면역내성 발견
		티셀리우스(1948, 화학상) 전기영동법을 이용한 혈청 분리 생어(1958, 화학상) 단백질 서열 해석법 개발	포터&에들먼(1959-62/1972) 항체의 화학적 구조 발견
	현상 발견	보르데(1896-1906/1919) 적혈구에 대한 항체 면역 반응에 관한 발견	라트슈타이너(1901/1930) 자크 밀러 가슴샘 발견(1960s)
	체액성 면역		세포성 면역

② 유전(자) 조절 분야 [표 22]

고전 유전학의 창시자라 불리는 모건(Thomas H. Morgan)이 1933년 유전학자로써 최초로 노벨 생리의학상을 수상한 이후 유전학 분야에서 많은 노벨상이 배출되었다. 특히, 유전물질인 DNA의 이중나선 구조가 규명된 1950년대 이후에는 새로운 DNA 분석 기술이 개발되거나 DNA의 생리활성 메커니즘이 규명될 때마다 노벨상이 수여되었다.

1960-70년대 이후 유전학은 새로운 방향으로 나아가기 시작했다. 이는 유전자가 비활성물질이라는 기존의 인식을 깨 맥클린톡(Barbara McClintock)의 발견과 관련이 있다. 맥클린톡은 ‘전이성 유전인자(transportable elements)’를 발견함으로써 유전자가 스스로 움직일 수 있는 활성물질이며, 유전자의 활성화로 인해 유기체의 발생 및 생리활성이 조절될 수 있음을 주장했다. 1950년경에 이뤄진 맥클린톡의 발견은 옥수수에서만 일어나는 특수한 사례로 치부되어 오랫동안 평가절하 되었으나 1970년대에 이르러 다른 생명체에도 ‘전이성 유전인자’가 존재한다는 것이 발견되면서 비로소 생면현상의 보편원리로 인정받게 되었다. 이후, 유전자와 관련된 발생 및 생체 조절 연구가 활발히 일어나게 되었고, 당연하게도 이는 면역학, 발생학, 세포생리학, 암 연구 등 다른 분야와 자연스럽게 연결되기 시작했다. (1980년대 이후의 이런 경향성은 아래 표에서 확인할 수 있다.)

1980년대 이후, 유전(자) 조절 분야는 면역학, 암연구, 발생학 등의 다른 연구 분야와 연관되는 경향이 강하게 나타나긴 하지만, DNA와 RNA의 발현 조절 메커니즘에 대한 연구도 여전히 각광받는 주제라고 할 수 있는데, 특기할 점은 20세기 중반과 달리 DNA보다 RNA에 관한 연구(RNAi, micro RNA 등)가 더 유망한 주제로 주목받고 있음을 확인할 수 있다.

[표 22] 유전(자) 조절 분야

	면역학	암 연구	발생학	세포생리학	
응용 확장	<p>도네가와 스스무(1970년대/1987)</p> <p>항체 생성의 유전적 원리 발견</p>	<p>비숍&바머스(1976/1989)</p> <p>발암 유전자(세포 성장조절 유전자)에 관한 연구</p>	<p>루이스&폴하르트&위샤우스 (197-80년대/1995)</p> <p>배아 분화를 조절하는 유전자 무리 호메오박스 발견</p>	<p>블랙번&그레이더&조스택 (2009)</p> <p>텔로미어 텔로머레이즈 발견</p> <p>브레너&셀스턴&호비츠 (2002)</p> <p>생체기관의 발생과 세포 사멸의 유전학적 조절에 대한 발견</p>	<p>카케키&에반스&스미시스(2007)</p> <p>생쥐의 배아줄기세포를 이용한 유전자 적응법 발견</p> <p>* Konck-out mice 탄생</p>
					<p>파이어&멜로(2006)</p> <p>이중나선 RNA에 의한 RNA 간섭현상 발견</p> <p>* 고등생물의 유전자 발현 억제 기전 발견</p>
특성 이론				<p>로버츠&샤프(1977/1993)</p> <p>절단유전자 발견</p> <p>* 고등생물의 유전자 발현 조절 기전 발견</p>	
현상 발견			<p>맥클린톡(1940년대/1983)</p> <p>전이성 유전인자 발견</p>		

③ 세포생리학 분야 [표 23]

세포생리학 분야가 노벨위원회의 관심을 받기 시작한 것은 비교적 최근인 1990년대 이후이다. 19세기 슈반(T. Schwann)과 슬라이덴(M. J. Schleiden)에 의해 세포설이 확립된 이후 세포에 대한 연구는 꾸준히 발전해왔지만, 광학현미경이 가진 배율의 한계로 인해 세포의 구조에 대한 연구는 거의 진척을 보이지 못했다. 생물학자들은 전자현미경이 발명된 1930년대 이후에야 세포의 내부를 들여다볼 수 있게 되었고, 이때부터 비로소 세포내 소기관의 구조와 기능을 규명하는 것이 가능하게 되었다. 이시기 전자현미경을 이용하여 세포의 내부 구조 및 기능을 연구할 수 있는 토대를 마련한 인물은 펄라디(George Palade), 클로드(Albert Claude) 그리고 뒤브(Christian de Duve) 등인데, 이들은 모두 1974년 노벨 생리의학상을 수상했다.

이들의 연구업적을 토대로 많은 세포생물학자들이 세포의 내부구조를 탐구하기 시작했다. 이들의 연구 분야는 ‘세포 간 정보교환’, ‘세포 내 단백질 조절’ 그리고 ‘세포 life cycle 조절’의 세 하위 분야로 분류할 수 있다. 1991년에 노벨상을 수상한 세포 단일 이온채널의 기능에 관한 네어(Erwin Neher)와 사크만(Bert Sakmann)의 연구는 ‘세포 간 정보교환’ 분야에 속하는 유일한 것이며, 이후에는 주로 ‘세포 내 단백질 조절’이나 ‘세포의 life cycle 조절’에 속하는 연구 주제들에 노벨상이 돌아갔다. ‘세포 내 단백질 조절’에 속한 연구주제는 다양하지만, 최근에는 세포 내에서 생성된 단백질이 활성을 얻고 특정 장소로 이동하는 메커니즘에 주로 관심이 몰려 있음을 확인할 수 있다. ‘세포 life cycle 조절’에 속하는 연구주제들은 2000년대 이후에 주목받기 시작했는데, 세포 사멸의 유전학적 조절(Brenner & Sulston & Horvitz, 2002년), 텔로미어와 텔로머레이즈의 기능(Blackburn & Greider & Szostak, 2009년) 등 주로 유전(자) 조절과 연관된 주제에 주된 관심이 쏠려 있음을 확인할 수 있다.

[표 23] 세포생리학

	세포 간 정보교환	세포 내 단백질 조절	세포의 life cycle 조절
응용 확장			블랙번&그레이더&조스택(2009) 염색체가 텔로미어·텔로머레이즈에 의해 보호되는 원리 발견
			브레너&셀스턴&호비츠(2002) 생체기관의 발생과 세포 사멸의 유전학적 조절에 대한 발견
특성 이론		블로벨(1980년대/1999) 세포 내 단백질 이동 경로를 규정하는 고유한 신호전달 체계의 발견	
		길먼&로드벨(1960년대/1994) G-단백질 발견과 세포 내 신호전달 체계에서의 기능 연구	
	네어&자크만(1970년대 중반/1991) 세포의 단일 이온채널 기능 연구 * 세포의 정보 교환에 관한 발견	피셔&크랩스(1977/1992) 가역 단백질 관한 연구 * 세포 내 단백질 조절 원리	하트웰&헌트&너스(2001) 세포주기의 핵심 조절인자 발견
80 년 이 전		클로드&뒤브&펠라디(1950년대/1974) 세포의 구조 및 기능에 관한 연구	

④ 기타 분야 [표 24]

면역학, 유전(자) 조절, 세포생리학 분야 이외에도 여러 분야에서 다수의 노벨상이 배출되었다. 특히 뇌, 호르몬, (신경)생리학 등의 분야에서는 1980년대 이후 각각 2개 이상의 노벨상이 배출되었다. 특기할 점은 20세기 초 이후 점차 감소했던 병원체 발견과 관련한 노벨상 수상이 1990년대 말 이후 세 차례나 된다는 것이다. 이 병원체들은 현대의 인류를 괴롭히는 주요한 질병과 관련되어 있다는 점에서 이를 치료할 수 있는 치료제가 개발될 경우 노벨상 수상으로 이어질 가능성이 높을 것으로 보인다.

또 한 가지 언급해야 할 사항은 2010년 체외수정 기술이 노벨상을 수상한 것으로 보아 향후 이와 연관된 연구들, 특히 줄기세포와 관련된 연구들의 연이은 수상이 기대된다는 점이다. 줄기세포는 면역거부 없는 조직이식을 가능케 함으로써 현재 불치병 혹은 난치병으로 분류되어 있는 다양한 질병의 치료제가 될 가능성이 높기 때문에 향후 이 분야에서 다수의 노벨상이 배출될 것으로 기대된다.

[표 24] 기타분야

	줄기세포	뇌연구	호르몬	대사조절	(신경) 생리학	병원체 발견
응용 확장	에드워즈 (2010) 체외수정 기술을 통한 최초의 시험관 아기 탄생	로버티&맨스필드 (2003) MRI에 관한 연구				
특성 이론		칼슨&그린가드&캔들 (2000) 신경계 신호전달에 대한 발견	코언&레비몬탈리치 (1950년대/1986) 세포성장을 촉진하는 성장인자의 발견		액설&벽(2004) 냄새 수용체와 후각 시스템 구조에 대한 발견	추어하우젠&바레누시& 몽타냐에 (2008) HPV/HIV 발견
		스페리&허블&비셀 (1960년대/1981) 대뇌반구의 기능과 시각정보화 과정에 관한 연구	베르스트림&사무엘슨& 베인 (1950년대/1982) 프로스타글란딘과 관련된 생물학적 활성물질에 관한 연구	브라운&골드스테인 (1972-3/1985) 클레스테롤 대사 조절에 관한 연구	피치고트&이그내로&머 래드 (1977-80/1998) 심혈관 시스템에서 신경전달물질로서 기능하는 일산화질소에 대한 연구	프루시너 (197-80년대/1997) 프리온 발견

(3) 징후적 지시자 분석을 통한 미래 유망 연구주제 발굴

노벨 생리의학상의 경우도 물리학상, 화학상과 마찬가지로 단·중기적 예측(10년 이내)과 장기적 예측(10년 이후)으로 구분하여 미래 유망 연구주제를 전망을 하고자 한다.

1901년부터 1972년도까지의 통계에 의하면, 노벨 생리의학상의 경우 수상연구가 나온 시기부터 수상할 때까지의 평균기간은 13.5년이며, 평균 수상자 나이는 51.2세이다.²⁸⁾ 그러나 최근 30년간의 통계에 따르면, 3개의 과학상 부문 모두에서 수상자 나이는 더 늦어지고 수상까지의 평균기간도 20년 이상으로 길어지고 있다. 따라서 앞으로 10년 이내에 수상할 가능성이 있는 연구주제와 연구자는 거의 예측 가능하다. 따라서 징후적 지시자를 통해 단·중기 내에 수상 가능한 연구주제를 예측할 수 있을 것이다.

생리의학상의 경우 우선 울프 의학상 전체 수상자 중에 33%정도가 노벨상을 수상하였고 평균 수상격차는 약 5년이다. 그리고 매우 중요한 징후적 지시자로 래스커상이 있다. 특히 래스커 기초의학상은 49%에 이르는 수상자가 노벨상을 수상하였고 수상격차는 평균 4.5년이다. 그리고 임상학과 특별상에서도 7.5%와 10%의 수상자를 각각 약 8년과 2년의 격차로 배출하였다. 다른 징후적 지시자인 톰슨로이터 인용상과 노벨심포지엄의 주제도 역시 좋은 징후적 지시자이다.

단·중기적 예측은 울프상의 의학 부문과 래스커상 그리고 톰슨로이터에서 예측된 연구 주제 중 아직 수상하지 않은 주제와 노벨 심포지엄의 주제 중에서 선정하였다. 징후적 지시자들은 현재 어떤 주제들이 각광 받고 있는 주제인지, 비교적 가까운 미래에 노벨상 수상이 기대되는 연구 주제가 무엇이며, 예상되는 수상자가 누구인지를 파악하는 데 있어서도 유용하게 이용될 수 있다.

단·중기적(10년 이내)으로 크게 앞서 언급한 주요 수상배출 분야인 다음 4개 분야로 구분하여 경향과 전망을 살펴보겠다. 주요 학자도 함께 표시하였다.

28) Zuckerman, *Scientific Elite: Nobel Laureates in the United States*.

◆ 단·중기 전망²⁹⁾

① 면역학 분야

면역학에서는 아직 규명되어야 할 세포성 면역 조절 메커니즘이 남아있고, 향후 조직이식과 같은 응용 등으로 나아갈 가능성이 열려 있으며, 현재 이를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

- T 면역세포 발견 (TH1 & TH2) 톱슨로이터(11) Robert Coffman & Timothy Mosmann
- 흉선 기능 규명 및 포유류에서 T세포와 B세포 발견 톱슨로이터(11) Jacques Miller
- 임상외과학과 전염병학에 메타 분석(meta-analysis) 적용 톱슨로이터(08) Richard Collins & Richard Peto
- 감마-포지티브 박테리아에 의한 급성 감염 노벨심포지엄(09)
- 결핵 예방과 치료 노벨심포지엄(00)
- HIV 치료법/백신 개발 노벨심포지엄(01)
- 조직 공학 및 재생의학 선구적 연구 톱슨로이터(11) Robert Langer & Joseph Vacanti
- 포유류에서 X-chromosome의 비활성에 관한 연구 울프(97) Mary Lyon

② 유전(자) 조절분야

1980년대 이후, 유전(자) 조절 분야는 면역학, 암연구, 발생학 등의 다른 연구 분야와 연관되는 경향이 강하게 나타나고 있다. DNA와 RNA의 발현 조절 메커니즘에 대한 연구도 여전히 각광받는 주제라고 할 수 있는데, 특기할 점은 최근 DNA보다 RNA에 관한 연구(RNAi, micro RNA 등)가 더 유망한 주제로 주목받는 경향이 있다는 점이다.

- DNA repair & cell destroy 유전자 p53 역할 연구 톱슨로이터(02) Bert Vogelstein
- 암 발생의 돌연변이 효과를 설명하는 Knudson hypothesis 제안 톱슨로이터(02) Alfred Knudson
- microRNA 래스커(08) & 톱슨로이터(08) Victor Ambros & Gary Ruvkon
래스커(08) & 울프(10,농학) David Baulcombe

29) 노벨심포지엄은 (개최 연도-심포지엄 번호)를 의미.

- 진핵세포 RNA 중합효소 및 동물세포의 일반적인 전사 기구에 관한 선구적인 연구 래스커(03) Robert Roeder
- Human Genome Project 톰슨로이터(02)
Francis Collins & Eric Lander & Craig Venter
- DNA profiling 기술 개발 톰슨로이터(06) Alec Jefferys
- Southern Hybridization 과 DNA fingerprinting 방법개발 래스커(05,임상) Alec Jefferys & Edwin Southern
- 유전자 발현 조절의 DNA methylation의 역할 연구 울프(08) Howard Cedar & Aharon Razin
- 유전자를 조작하여 쥐의 난자와 배아에 적용하는 연구 울프(02) Ralph Brinster
- 발생과 질병에서 후성유전학적 재프로그래밍 노벨심포지엄(04-128)

③ 세포생리학 분야

세포의 수준의 생리현상과 관련된 분자생물학적 연구는 중요한 연구주제로 각광 받고 있으며, 특히 세포수준과 생리현상과의 관계를 전체적으로 조망하는 시스템 생물학은 인간게놈프로젝트가 종료된 후에 더욱 중요한 주제가 되었다.

- 핵호르몬 수용체의 superfamily의 발견 및 배아발달과정과 다양한 대사과정을 조절하는 통합된 메커니즘의 발견 래스커(04) & 톰슨로이터(06)
Pierre Chambon & Ronald Evans & Elwood Jensen
- 세포내 세포막간 신호전달, 특히 inositol triphosphate의 역할 규명 톰슨로이터(02) Michael Berridge
- 세포내 신호전달과 분자수준에서 관련 단백질 연구와 질병치료를 위한 응용연구 울프(05) Alexander Levitzki & Anthony Hunter & Anthony Pawson
- 시스템 생물학 노벨심포지엄(09-146)
- 단백질 접힘, 그리고 관련된 단백질 샤페론(chaperone) 규명 래스커(11) & 톰슨로이터(07) Franz-Ulrich Hartl & Arthur Horwich
톰슨로이터(07) John Ellis
- 막 운반체 이동(vesicle transport) 래스커상(02) & 톰슨로이터(09)
James Rothman & Randy Schekman

④ 기타분야

위의 세 분야이외에 병을 일으키는 원인에 대한 연구, 난치 또는 불치병의 치료에 중요한 줄기세포 연구, 뇌연구, 대사 조절 연구, 새로운 측정장치의 개발 등 다양한 유망연구주제가 중요한 주제로 주목받고 있다.

· 최초의 줄기세포 추출 실험	래스커(05) & 톰슨로이터(10) James Till
· 역분화 만능 줄기세포 연구와 그 응용 연구	래스커(09)&울프(11)&톰슨로이터(10) Shinya Yamanaka 울프(89) & 래스커(09) John Gurdon 울프(11) Rudolf Jaenisch
· 포유류 뇌의 신경발생(neurogenesis)	톰슨로이터(07) Fred Gage
· fMRI	톰슨로이터(09) Seiji Ogawa
· 인간정신의 고유한 특징 이해: 복합적 인지의 신경과학	노벨심포지엄(10-145)
· 유전자, 뇌 그리고 행동	노벨심포지엄(08-137)
· Proto-oncogene Ras의 발견 및 Tumor Suppressor 개념 도입	울프(04) & 톰슨로이터(02) Robert Weinberg
· 암치료에 획기적인 치료제 개발을 위한 연구	울프(10) Axel Ullrich
· 비만연구의 획기적 진전을 가능하게 한 식욕 조절 호르몬 leptin의 발견	래스커(10) & 톰슨로이터(10) Douglas Colman & Jeffrey Friedman
· 골수 백혈병의 획기적 치료제 imatinib(Gleevec) 와 dasatinib(Sprycel)개발	톰슨로이터(11) Brian Druker & Nicholas Lydon & Charles Sawyers
· 관상동맥성심장병 치료에 획기적인 LDL-콜레스테롤을 낮추는 치료제 Statin 개발	래스커(08,임상) Akira Endo
· Affinity chromatography의 개발과 생의학적 응용	울프(87) Pedro Cuatrecasas & Meir Wilcheck
· 패혈증과 쇼크: 발병과 새로운 치료법	노벨심포지엄(03-124)

장기적인 주제를 예측하는 것으로서는 최근 교육과학기술부에서 시행한 “기초과학연구 100대 유망 연구영역 선정을 위한 기획연구”의 생명과학/의약학 부문 중에 적합한 것을 포함하였다.³⁰⁾ 노벨 생리의학상 수상을 주관하는 카롤

린스카 연구소의 비로(J. C. Biro)가 2004년 *Medical Hypotheses*에 발표한 “Seven fundamental, unsolved questions in molecular biology”는 그 동안 DNA의 유전정보가 단백질까지 한 방향으로만 전해져 만들어진 단백질이 복잡한 생리적 반응을 한다는 중심가설(Central Dogma)에 대해 이를 위배할 수 있는 7가지의 미해결의 근본적인 문제의 연구주제를 제안하고 있는데 이를 정리하여 포함하였다.³¹⁾ 역시 저자 John R. Vocca가 노벨 수상자 40여명을 비롯하여 60여명을 인터뷰하여 저술한 “The world's 20 greatest unsolved problem”에 제안한 주제 중에 생명과학에 관련된 5 주제를 정리 하였다.

◆ 장기 전망

기초연구 100대 유망 연구 생명과학/의약학 부문
(기초연구사업추진위원회, 교육과학기술부 2011.5)

여기서 언급된 연구주제는 논문분석과 전문가 추천을 거쳐 1차적으로 선정된 주제를 대상으로 2차로 전문가의 설문조사를 거친 뒤, 최종적으로 산학연 전문가 20인이 선정한 것이다. 언급된 주제 중에 상당부분이 이미 단·중기적 주제에서 언급된 주제이다. 뿐만 아니라 제안된 연구 주제들의 대부분이 구체적인 주제라기보다는 분야의 일반적인 목표를 간단히 서술한 수준이다. 생리학부문은 질병 치료를 위한 기초연구라는 의미에서, 생명체의 작용 메커니즘을 더 깊이 이해하는 연구가 좋은 연구라고 할 수 있다. 여기에 포함된 대부분의 연구주제가 응용, 즉 질병의 치료에 초점이 맞추어져 있기 때문에 이러한 응용을 달성하기 위한 기초적인 세부 연구 주제를 발굴해야 할 것이다.

-
- 1) 줄기세포
 - 2) 뇌신경 기능과 질환
 - 3) 감염성 질환
 - 4) 면역체계 조절 기전
 - 5) 나노약물 전달체

30) 백동열 등, 『기초과학연구 100대 미래유망 분야 선정을 위한 기획 연구』; 교육과학기술부, 『기초연구 100대 미래유망분야 선정결과 및 활용방안(안)』 참조.

31) J. C. Biro, “Seven Fundamental, Unsolved Questions in Molecular Biology,” *Medical Hypotheses* 63 (2004), p. 951-962.

- 6) 암세포 전이기전
- 7) 질환의 원인과 새로운 치료법 : 당뇨병, 심혈관, 신경계, 우울증
- 8) 단백질 상호작용
- 9) 유전정보학
- 10) 핵산 및 단백질 기반 신약 표적 및 개발
- 11) 식물 병해충 방어기작
- 12) 후성유전학
- 13) 분자이미징
- 14) 유전자 치료
- 15) RNA 기능 분석 및 응용
- 16) 이온채널
- 17) 자가포식 (Autophagy)

"Seven Fundamental, Unsolved Questions in Molecular Biology"

(J. C. Biro, *Medical Hypotheses* 2004, Vol. 63)

- 1) 유전자의 DNA의 양쪽 가닥 존재와 발현
(Genes are located and expressed on both DNA strands.)
- 2) 인트론의 기능
(Introns are the source of important biological regulation and diversity.)
- 3) 반복되는 코드의 의미
(Repeats are the frame of the chromatin structure and participate in the chromatin regulation)
- 4) 분자수준의 표준적 이중나선 DNA 구조와 반응과정
(The molecular accessibility of the canonical dsDNA structure is poor.)
- 5) 유전암호의 아미노산과 공진
(The genetic code is co-evolved with the amino acids and there is a stereochemical matching between the codes and amino acids.)
- 6) 유전정보의 양방향 흐름
(The flow of information between nucleic acids and proteins is bi-directional and reverse translation might exist.)

7) 복잡한 유전정보의 핵산과 단백질에 함께 작동되고 저장

(Complex genetic information is always carried and stored by nucleic acids and proteins together.)

“The world's 20 greatest unsolved problem" 생명과학 부문

(John R. Vocca, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA 2005)

노벨상 수상자 40여명을 포함한 60여명의 세계적으로 저명한 학자들을 인터뷰할 결과를 저자가 정리한 것으로 이 책은 물리학, 화학, 생명과학, 지구과학의 기초 과학 분야의 중요하지만 아직 해결하지 못한 20개의 문제를 자세히 소개하고 있다. 그 중 생명과학관련 주제는 5개이다.

1) Biology : How the Basic Processes of Life are Carried out by DNA and Proteins

2) Biology : Protein Folding

3) Paleontology : How Present-Day Microbiological Information Can Be Used to Reconstruct "The Ancient Tree of Life"

4) Neuroscience : Free Will

5) Neuroscience : Consciousness

이상에서 제안된 연구 주제를 보면 10년 이후의 장기적인 미래를 위하여 연구해야하는 주제이기에 연구주제의 구체성은 부족하지만 궁극적으로 무엇을 위한 연구인지 목적은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 인간의 면역체계의 근본적인 이해와 이를 응용하는 새로운 질병 대응 연구
- 유전자로부터 시작되어 작용하는 각종 생리현상의 분자수준 이해
- 세포내의 복잡한 반응 네트워크의 근본적인 이해
- 인간의 주요 질병의 근본적 원인과 치료법
- 노화의 원인 규명과 장기를 대체하는 연구

- 인식의 과학적 규명 등 뇌 연구
- 생리학 연구에 중요한 진전을 보일 수 있는 연구방법 또는 장비 개발

3장. 우수 연구 주제 형성 과정 탐구

1. 왜 연구 문제 형성이 중요한가?

좋은 주제, 좋은 문제를 선택하는 것은 좋은 연구로 나아가는 첫 걸음이다. 1967년 노벨 화학상을 수상한 만프레드 에이겐(Manfred Eigen)은 노벨상 수상자들과 그보다는 좀 더 평범한 연구자들 사이의 가장 중요한 차이를 좋은 문제를 구별해 내는 능력에서 찾았다. 노벨상 수상자들은 여러 문제들 중에서 해결 가능한 문제를 선별하여, 거기에 집중함으로써 좋은 성과를 얻을 수 있다는 것이다.

그렇다면 좋은 문제의 기준은 무엇이고, 그것은 어떻게 만들어질 수 있을까? 이는 답하기 무척 어려운 문제이다. 연구자들마다 좋은 문제의 기준이 모두 다르다는 것이 그 한 가지 이유이다. 위에서 언급한 아이겐의 경우 좋은 문제의 중요한 기준은 해결 가능성에 있었다. 노벨 물리학상 수상자인 리처드 파인만은 오래 전부터 그 문제가 제기되었으나 그동안 해결되지 못했던 난제를 해결할 만한 가치가 있는 문제로 생각했다. 원자 폭탄 개발 과정에서 즉흥적인 재치를 자랑했던 파인만이었지만, 전쟁이 끝난 후에는 자신의 그런 재능을 충분히 발휘할 수 있는 양자전기동역학의 난제에 도전했다. 한 과학자의 일생을 바쳐 한두 문제만 해결한다고 해도 충분히 그 가치를 인정받을 만한 문제, 그런 난제에서 파인만은 가치를 찾았던 것이다. 그에 비해 새로운 분야를 시작할 수 있는 새로운 문제, 연구 최전선의 문제인가에 무게를 두는 연구자들도 있다.

과학사나 과학철학에서 과학탐구에 대해 이뤄진 많은 연구들은 문제를 이미

주어졌다고 전제한 뒤, 그 문제를 어떻게 해결했는가에 초점을 맞춰 해결 방식과 그 방식에 영향을 미친 요인들을 찾는 데 주력해 왔다. 그에 비해 좋은 문제를 어떻게 형성하는가에 대한 연구는 상대적으로 간과되어 왔다. 어쩌면 연구자들에 의해 간과되어 왔다기보다는, 문제 형성 과정 자체가 어떤 명시적인 분석을 회피해 나갔다는 것이 더 맞는 말일 것이다. 한 예로, 노벨수상자들의 뛰어난 능력의 원천을 분석해 보려던 한 연구자는 이들 수상자들이 좋은 문제를 선별할 줄 아는 특별한 감(feeling)과 선호(preference), 신념(belief) 등을 지니고 있다고 주장했지만, 그것을 초인지(extracognitive)적인 능력으로 평가하면서 더 이상의 분석을 시도하지는 않았다.³²⁾

문제 형성 과정에 대한 분석이 어려웠던 또 다른 이유 중에 하나는 문제 형성 과정이 과학 연구의 시작 단계에서만 이루어지는 것이 아니라, 연구 전 과정을 통해 일어나기 때문일 것이다. 레베카 라이프와 그의 공동 연구자들에 따르면, 과학교과서에서는 문제 형성이 연구의 시작 단계에서 이루어지는 것으로 묘사를 하고 있고 그 뒤에는 선형적인 과정을 거쳐 연구가 이루어지는 것으로 과학 방법론을 묘사하고 있지만 실제 과학자들이 연구를 하는 과정은 전혀 이런 단순한 선형적 과정을 따르지 않는다고 주장한다.

라이프 등이 주장하는 바에 따르면, 문제 형성은 관찰, 문제의 정의, 질문의 형성, 선행 연구 및 지식 분석, 예상의 명료화, 연구 수행, 결과 해석, 발견(findings)에 대한 고찰, 발견 결과의 커뮤니케이션이라는 연구의 모든 과정에서 문제의식이 이 모든 과정과 상호작용을 하며 이루어진다. 이 상호작용을 통해 연구에서 해결하려는 질문은 좀 더 구체화되고 명료화되며 때로는 변하기도 한다.

라이프와 그의 공동 연구자들은 이를 ‘탐구의 바퀴’로 모델링했다(그림 4). 이 그림에서 질문은 탐구의 모든 과정과 상호작용을 하며 서로서로를 명료화시키고 수정시켜 나간다. 이들의 모형에서 흥미로운 점은 이 모든 과정이 단순한 순환적인 사이클이 아니라는 점이다. 이런 점에서 이들은 자신들의 모형이 연구의 사이클을 보여주는 것이 아니라, 연구의 그물망을 표현하고 있는 것에 더 가깝다고 설명했다.

32) Larisa Shavinina, "Explaining High Abilities of Nobel Laureates," *High Ability Studies* 15:2 (2004), pp. 243-254.

The Inquiry Wheel

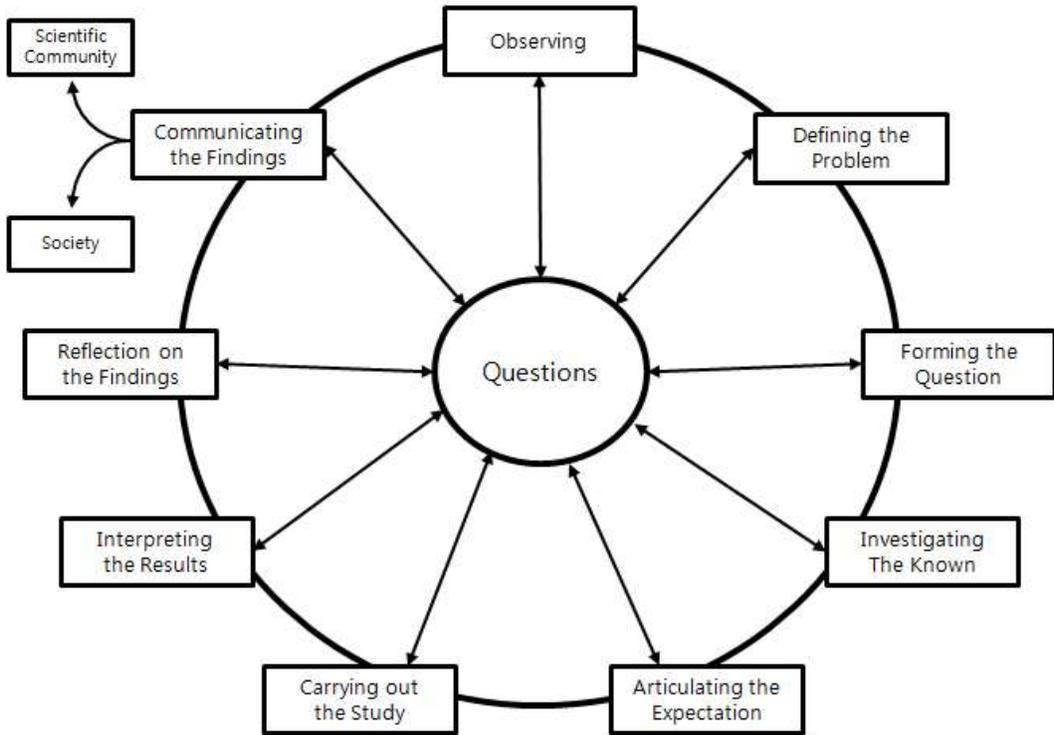


그림 4. 탐구의 바퀴(Inquiry Wheel). (출처: Rebecca Reiff and Williams Harwood and Teddie Phillipson, “A Scientific Method Based upon Research Scientists’ Conception of Scientific Inquiry,” in *Proceedings of the Annual International Conference of the Association for the Education of the Teachers in Science* (2002), p. 11.

문제 형성 분석의 어려움 때문에 이에 대한 연구가 많지는 않지만, 그런 중에서도 루트번스타인은 이에 대한 일련의 분석을 시도했다. 그는 ‘알지 못하는 것’에 대한 분석으로부터 무지를 질문으로 어떻게 만들어 낼 수 있는지, 문제 형성 과정을 연구했다.

루트번스타인에 따르면, 무엇이 문제인가를 찾아내기 위해서는 우선 무엇을 모르는가를 알고 있어야 한다. 번스타인은 무지의 영역을 다음과 같이 4개로 분류했다.³³⁾

- ① 명백한 무지: 모른다는 사실을 알고 있는 경우
- ② 가려진 무지: 모른다는 사실을 모르고 있는 경우
- ③ 잘못 알려진 무지: 알고 있다고 생각하지만 실제로는 모르는 경우
- ④ 알려지지 않은 지식: 이미 밝혀졌지만, 모른다고 알려져 있는 경우

무지의 종류에 따라 각각의 영역에서 문제를 도출해 내는 방식도 달라질 수 있다. 이미 모른다는 것을 자각하고 있는 무지의 영역은 문제가 무엇인지를 파악하고 있으나 해결책을 찾지 못하고 있는 경우에 해당한다. 이 경우에는 현재 제시된 문제의 가정이나 문제 제기 방식에 오류가 있어서, 즉 문제 자체가 잘못되어 해결책을 찾기 어려운 경우일 가능성이 있다. 이 경우 문제를 자체를 뒤집는, 다시 말하면 문제를 문제 삼음으로써 난제를 해결 가능한 의미 있는 문제로 바꿀 수 있다. 문제를 문제 삼는 방법으로는 다음의 방법들을 활용할 수 있다.

- 질문에 내재되어 있는 가정 문제 삼기: 난제의 경우, 질문에 깔려 있는 가정 자체가 모순을 내포하고 있거나 잘못된 가정을 출발점으로 삼고 있을 수 있다. 이런 경우 질문 뒤에 숨어 있는 가정의 타당성, 문제와의 연관성 등을 따져서 질문에 내포되어 있는 오류를 찾아내고, 새로운 문제를 도출할 수 있다.
- 패러독스에 주목하기: 그 문제가 패러독스를 안고 있지는 않은가? 문제가 낳는 패러독스에 주목하면 문제가 안고 있는 내적 모순, 혹은 문제에 포함되어 있는 잘못된 가정, 전제 등을 찾아낼 수 있다.
- 일상의 고귀함을 깨닫는 법 배우기: 전문적인 영역으로 들어갈 경우, 오히려 상식적인 사고를 놓치기 쉬울 수가 있다. 오랫동안 해결되지 않은 문제라면 때로는 상식적인 사고를 기반으로 그 문제가 제대로 ‘문제화’되었는지 체크해 볼 필요가 있다.

33) Robert Root-Bernstein, "Problem Generation and Innovation," pp. 171-174.

모른다는 것을 모르는 숨겨진 무지의 영역에 속하는 문제들은 찾아내기가 쉽지 않다. 이런 영역에서는 예상치 못한 발견을 통해 문제를 찾아내는 경우가 많다. 이런 예상치 못한 상황을 인위적으로 만들어냄으로써 숨겨진 무지의 영역에 속한 문제를 수면 위로 부상시킬 수 있는데, 이를 위해 다음과 같은 방법이 유용하게 이용될 수 있다.

- 예상/기대에 도전하는 연구를 설계하기
- 합리적인 사람이라면 찾지 않을 만한 그런 정보를 찾기
- 실험을 할 때 많은 변수를 주고, 때로는 터무니없는 컨트롤 시도
- 의도적으로 시각을 바꾸어 상황/현상/문제를 바라보기
- 모순에 주목하여, 모순과 덩굴어보기
- 어떤 아이디어로부터 도출될 수 있는 가장 어처구니없는 결과를 생각해보기

알고 있다고 생각하지만 실상은 잘못 알려져 있는 ‘잘못 알려진 무지’의 영역은 알고 있다고 믿는 바로 그 점 때문에 문제가 노출되기 어렵고, 문제가 발견되는 경우에도 다른 사람들의 동의를 얻기가 쉽지 않다. 이런 영역에서는 다음과 같은 방법이 문제를 찾아내는 데 유용하다.

- 모든 상관관계(correlations)를 의심하기
상관관계가 인과관계가 아닐 수 있다.
- 습관에 이의를 제기하기
- 선입견에 가장 잘 맞는 결과나 발견을 의심하기
- 이상 현상(anomalies)을 모으기
- 불가능한 것을 시도해보기

과거 어느 순간에 알려졌으나 그 이후 잊혀진 지식 혹은 지구의 어떤 지역에서는 알려져 있으나 지금 우리에게 알려지지 않은 숨겨진 지식은 흔히 분야 전문가들이 믿을만한 출처라고 여기지 않는 사람들 사이에 존재하거나, 혹

은 ‘진보’라는 이름 아래 간과되어진 역사적 문서 속에 존재한다. 이와 관련된 문제들을 발굴하기 위해서는 전문가 사회에서 신뢰할 만하다고 간주되는 출처를 넘어 비전문가의 경험이나 과거의 문서에 담겨 있는 지식에 의지하는 방법을 이용할 수 있다. 이와 관련해서 다음과 같은 방법이 도움을 줄 수 있다.

- 50~100년 전에 행해진 고전적인 실험들을 현대적인 테크닉으로 해 보기

이상의 논의들을 바탕으로, 다음에서는 노벨수상자들의 자서전이나 회고를 중심으로 그들이 어떻게 연구 주제를 형성해 나갔는지를 살펴보고 이로부터 몇 가지 팁을 도출해 볼 것이다.

2. 노벨상 수상자들의 우수 연구 주제 형성 사례 연구

가. 하이젠베르크 (1932년 노벨 물리학상 수상)³⁴⁾

베르너 하이젠베르크(Werner Heisenberg, 1901-1976)는 독일 출신의 이론물리학자로서 양자역학을 확립한 공로로 1932년 노벨 물리학상을 수상하였다. 하이젠베르크는 독일이 1차 세계대전에서 패한 직후의 혼란기에 고등학교와 대학을 나왔다. 그는 뮌헨지역의 명문 막시밀리안 김나지움(Maximilian Gymnasium)을 졸업하고 뮌헨대학에 장학생으로 입학했다. 김나지움 시절 고급 수학을 거의 독학으로 공부하였는데 이미 수학자 헤르만 바일(Herman Weyl)이 아인슈타인의 상대성이론의 원리에 관해 쓴 『공간, 시간, 물질』을 읽고 수학을 전공하기로 결심한다. 또한 청소년기에 읽은 플라톤의 『티마이오스 *Timaeus*』는 하이젠베르크의 물질관에 평생토록 영향을 미쳤다. 그는 자서전인 『부분과 전체』에서 어린 시절 자신은 『티마이오스』에서 언급되어 있는 물질의 최소단위에 관한 철학적 사색이 너무 사변적이라 불합리적이라 생각하여 그것에 관하여 김나지움 시절부터 친구들과 논의를 하였고, 이때부터 새로운 이론을 찾는 것이 필요하다고 생각하였다고 회고한 바 있다. 하이젠베르크는 김나지움과 대학시절 가끔씩 친구들과 도보여행을 하면서 이런 깊은 대화를 나누었는데, 이런 대화를 통해 일생동안 몰두할 관심사를 찾고 학문적인 기반을 다지게 된다. 친구, 동료, 선생들과의 대화는 하이젠베르크가 연구주제를 형성하는 데 가장 중요한 역할을 하였던 것이다.

대학시절 스승인 쾰머펠트와의 대화 역시 하이젠베르크에게 중요한 영향을 미쳤다. 하이젠베르크는 대학에 입학한 후 수리물리학교수인 쾰머펠트와 면담하게 되었는데, 그 자리에서 그는 과학의 사소한 문제를 해결하는 것 보다는 그 근본에 있는 철학적 문제에 관심이 있다고 말했다. 그러나 쾰머펠트는 “왕

34) 하이젠베르크, 김용준 역, 『부분과 전체(개정신판)』 (지식산업사, 2005); 하이젠베르크의 Biography와 노벨상 강연은 다음을 참조하라. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1932/heisenberg.html (2012. 1. 15. 접속)

이 공사를 시작하면 비로소 일꾼이 할 일이 생긴다”는 것을 인용하며 우선 작은 문제를 성실히 연구할 것을 제안했다. 쯔머펠트의 제안에 자극을 받은 하이젠베르크는 자연과학의 새로운 신천지를 학자들과의 공동연구를 통하여 해결할 수 있다는 생각에 매료되었고, 이에 이론물리학을 전공하기로 결심했다. 그런데 당시의 최신 물리학 성과인 상대성이론은 이미 아인슈타인이 해결하였다고 판단하고 여전히 미지의 영역인 원자론을 연구주제로 정하게 된다. 그리고 쯔머펠드 문하생이 되는데, 그 당시 역시 쯔머펠드의 문하생이었던 볼프강 파울리와 평생 학문적 동반자가 된다.

하이젠베르크는 자신의 학문적 발전에 가장 크게 영향을 미친 것은 1922년 여름 닐스 보어와의 대화였다고 회고했다. 괴팅겐에서 열린 보어축제(닐 보어의 원자이론 강의)에 참석한 하이젠베르크는 보어와 산책하면서 긴 대화를 나누었는데, 이때 보어는 자기의 원자이론의 배경 설명을 하는데, 그 과정에서 하이젠베르크는 아직 원자의 구조를 이해할 언어가 없기 때문에 수학적 계산을 통해서만 설명할 수 없다는 깨닫고 과연 자연을 이해한다는 것이 무엇인가를 생각하게 된다. 이 후에도 보어를 포함한 여러 동료학자들과 도보여행을 하며 나눈 대화는 원자의 구조에 관한 하이젠베르크의 생각을 구체화하는데 중요한 역할을 한다.

1925년 말 하이젠베르크는 고초열이라는 병을 얻어 헬골란트섬에 요양을 떠나 2주간 혼자 지내게 되었는데, 이때 양자역학의 한 축이 된 수학적 도식에 의한 ‘행렬역학’을 완성하게 된다. 이 결과는 파울리, 보른, 요르단, 디랙과 같은 동료와 스승에 의해 검증되었고, 1926년 봄에는 베를린의 물리학토론회에 초청되어 강연을 하게 되었다. 이 토론회 기간에 하이젠베르크는 아인슈타인의 집에 초대되어 그에게 양자역학이론의 개념과 수학적 기초를 설명하고 토론하게 된다. 이 과정에서 아인슈타인은 하이젠베르크에게 자연에 관하여 알고 있는 것(관찰한 것)만을 이야기 하고 있고, 자연이 실제로 작용하는 것(자연의 근본적 원리)에 대하여 말하지 않는 것에 대하여 경고를 한다. 즉 하이젠베르크는 관찰의 중요성에 의미를 두고 그것을 만족하는 수학의 해를 발견한 것이고, 이에 대해 아인슈타인은 실험적 관찰의 한계를 지적하면서 절대적 진리를 추구하는 것이 중요하다고 지적한 것이다.

그 해 곧이어 파동역학이라고 불리는 슈뢰딩거 연구결과가 발표되고 원자를 연속적인 파동으로 설명하는 것이 가능해 짐에 따라 하이젠베르크의 불연속적인 양자적 전이 이론에 문제제기가 일어났다. 이를 해결하기 위하여 보어와 하이젠베르크는 집중적인 대화를 통한 공동연구를 계속하는데 완전히 벽에 부딪혀 있음을 느끼게 된다. 결국 두 학자는 휴식이 필요함을 느끼고 1927년 2월 따로 떨어져 있게 되는데 하이젠베르크는 이때 이전에 아인슈타인이 실험적 관찰의 한계를 지적하면서 얘기한 “이론이 비로소 사람들이 무엇을 볼 수 있는가를 결정한다”라는 언급으로부터 새로운 깨달음을 얻어 안개상자의 전자 궤도실험 관찰의 부정확성을 인식하고 불확정성의 원리를 발견하게 된다. 반면 보어는 이 기간 동안 파동성과 입자성의 상보적 원리를 인식하게 되고 결국 보어와 하이젠베르크는 불확정성원리와 상보적 원리가 같은 의미이고 슈뢰딩거의 파동역학 후 제기된 문제의 해결책에 대하여 같은 의견을 갖게 된다.

1927년 가을 5회 솔베이토론회에서 보어-하이젠베르크와 아인슈타인-슈뢰딩거의 논쟁이 벌어진다. 이 회의에서 아인슈타인은 “신은 주사위놀이를 하지는 않는다”는 이야기로 보어-하이젠베르크의 이론을 받아들이려고 하지 않았지만 결국 양자역학에 대한 보어-하이젠베르크의 해석(코펜하겐 해석이라고 불려짐)이 학자들의 지지를 받으면서 토론회가 끝나고 그 이후 양자역학의 표준이론으로 자리 잡게 된다. 결국 하이젠베르크는 이 이론으로 노벨 물리학상을 수상하였다.

하이젠베르크가 문제를 만들어 가고 해결하는 과정을 보면, 우선 주위의 우수한 학자들(그 중에는 상당수가 역시 노벨상 수상자이거나 후에 수상을 하게 됨)과 끊임없는 대화를 통하여 애당초 문제조차도 불분명한 것을 점점 구체적인 문제로 만들었다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 혼자서 집중적으로 연구하여 해결책을 찾은 다음 주위의 학자들에게 자신이 찾은 해결책이 정말 맞는 것인가를 대화를 통해 검증받고, 아직 미결해의 문제를 구체화하고 또 이를 해결하는 방안을 구상하는 과정을 통하여 양자역학이라는 큰 학문 체계를 완성했다고 볼 수 있다.

나. 란다우와 란다우 학파 (1962년 노벨 물리학상 수상)³⁵⁾

레프 다비도비치 란다우(Lev Davidovich Landau, 1908-1968)는 소련 출신의 물리학자이다. 그는 1937-1962년까지는 모스크바 과학아카데미의 물리문제연구소(the Institute for Physical Problems)에 있으면서 그 연구소를 만든 물리학자 포트르 카피차(Pyotr Leonidovich Kapitsa, 1894-1984, 1978년 노벨 물리학상 수상)가 실험으로 발견한 액체 헬륨의 이상 현상(초유체 현상)에 대해 이론적 설명을 시도했다. 그는 이를 확장하여 양자 유체에 대한 완전한 이론을 만드는 데 공헌한 공로로 1962년 노벨 물리학상을 수상했다.

란다우는 물리문제 연구소에서 이론물리학 파트를 이끌면서 이 분야의 이론물리학 전통을 세웠다. "란다우 학파(Landau School)"라는 이름으로 상징되는 이 전통에는 레프 피타에프스키(Lev Pitaevskii), 아르카디 르반유크(Arkady Levanyuk), 에브게니 리프쉬츠(Evgeny Lifshitz), 레프 고르코프(Lev Gor'kov), 이삭 칼란트니코프(Isaak Khalatnikov), 보리스 이오페(Boris L. Ioffe), 로알드 사그데예프(Roald Sagdeev), 이삭 포메란처크(Isaak Pomeranchuk), 알렉세이 아브리코소프(Alexei A. Abrikosov) 등 란다우의 학생들이 속해 있었고, 공식적으로 란다우의 지도를 받은 적은 없지만 이 연구소에서 그와 함께 란다우-진즈부르크 이론을 세운 비탈리 진즈부르크(Vitaly Ginzburg) 또한 이 전통에 속한다고 할 수 있다. 이들 중 진즈부르크와 아브리코소프는 2002년 노벨상을 수상하여, 이 연구소의 명성을 다시 한 번 입증했다.

연구 주제의 형성의 측면에서 볼 때, 란다우 학파는 비교적 분명하게 정해진 연구 문제를 공유하고 있었다고 볼 수 있다. 물리 문제 연구소를 세운 카피차가 발견한 초유체 현상이 중심 주제였다. 란다우 학파에 속한 연구자들은 초유체라는 이미 정해진 연구 영역 안에서 연구 주제를 찾았고, 특히 그들의

35) 란다우의 간략한 Biography와 노벨상 강연에 대해서는 다음을 참조하라. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1962/landau.html (노벨상 홈페이지, 2012. 1. 15. 접속); http://en.wikipedia.org/wiki/Lev_Landau (위키피디아, 2012. 1. 15. 접속). 란다우 학파와 동료들에 관한 정보는 다음을 참조했다. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2003/ginzburg.html (노벨상 홈페이지-진즈부르크, 2012. 1. 15. 접속); http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2003/abrikosov.html (노벨상 홈페이지-아브리코소프, 2012. 1. 15. 접속).

스승인 란다우가 제시해 놓은 문제들을 해결하고 입증 혹은 검증하는 연구를 수행했다. 즉, 그들이 란다우 학파에 받을 담근 순간부터 그들이 해결해야 할 문제는 어느 정도 정해져 있었다고도 할 수 있는 것이다. 이런 점에서 그들은 풀어야 할 문제가 이미 정해져 있고 그것을 어떻게 해결해야 하는가가 더 중요한 이슈가 되는, 쿤 식으로 말하자면 ‘정상과학’의 영역 안에 있었다고 볼 수 있는 것이다.

하지만 이것만으로 그들 학파의 훌륭한 연구 성과를 설명하기는 부족하다. 란다우를 비롯한 란다우 학파의 문제 해결 형성 과정에서 중요했던 것은 초유체라는 한정된 문제를 풀면서도 물리학 전체에 대한 조망을 잃지 않도록 했던 란다우 학파의 독특한 교육 과정에 있었다. 이는 “이론적 최소(Theoretical Minimum)”라는 란다우 학파의 독특한 시험을 통해 교육되었던 것으로 보인다. 란다우가 개발한 이 시험은 이론 물리학의 모든 분야를 포괄하는 것으로, 이론 물리학에 대한 전체적인 조망을 주기 위해 기획되었다. 이 시험을 통과한 학생들만이 란다우의 연구소에 들어올 수 있는 자격을 부여받았는데, 1934-1961년 거의 27년 동안 겨우 43명만이 이 시험을 통과할 정도로 매우 어려운 시험이었다.

란다우 학파에 속했던 진즈부르크가 2002년 노벨상 강연에서 제안한 “물리적 최소(Physical Minimum)”를 통해 란다우의 이론적 최소가 어떤 성격을 지녔을지 짐작해 볼 수 있다. 간단히 말하자면 물리적 최소는 “물리학과 전체 물리학의 문제 중에서 가장 흥미롭고 중요한 문제가 무엇인가”에 대한 목록을 작성하는 것이다. 물리학의 전문화와 세분화로 인해 오늘날 많은 물리학자들이 자신의 주제에 몰두하여 물리학의 커다란 문제들과 큰 흐름을 간과하기 쉬운데, “물리적 최소”라는 가장 중요한 문제 목록을 만들고 때때로 이 목록을 재점검하고 수정하여 자신의 연구와 물리학의 커다란 흐름 사이의 관련성에 대해, 자신의 연구가 물리학의 "큰 질문들(Big Questions)"에 어떤 식으로 기여할 수 있을 지에 대한 안목을 갖도록 해 주는 것이 바로 이 물리적 최소 리스트에 해당하는 것이다. 물론 이 목록은 상당히 주관적인 성격을 띤 것이고 또 물리학의 변화에 따라 그 목록에 오른 주제들도 계속해서 변화해 나간다. 진즈부르크는 그 변화의 추세를 이해하는 데 바로 이 목록을 계속해서 작성하는

것이 도움이 된다는 점을 지적하고 있다.

노벨상 강연에서 그는 자신의 21세기 물리학의 “물리학 최소”로 30개의 주제를 제시했다. 이 목록은 앞서 물리학의 장기 유망주제에서 소개하였다.

다. 스티븐 추 (1997년 노벨 물리학상)³⁶⁾

스티븐 추(Steven Chu, 1948-)는 미국 물리학자이자 현 미국 에너지부 장관이다. 그는 레이저로 원자를 냉각, 포획하는 방법을 개발한 공로로 코엔 타누지(Claude Cohen-Tannoudji), 윌리엄 다니엘 필립스(William Daniel Phillips)와 공동으로 1997년 노벨 물리학상을 수상했다.

그의 원자 냉각 기술은 6개의 레이저를 x, y, z 축 각각 2개씩 서로 반대 방향으로 배치하여, 총 6개의 레이저로 원자의 운동을 제어하는 기술로, 이런 방식으로 원자의 움직임을 제어하여 개별 원자들을 상당히 정확하게 연구할 수 있고 매우 정밀한 원자 시계를 만드는 데도 활용될 수 있다.

원자 냉각 기술 연구는 추가 벨 연구소의 연구원으로 있던 시절에 이루어진 것이었다. 동료 과학자였던 아트 애쉬킨(Art Ashkin)과의 사적인 대화가 그를 이 주제에 관심 갖도록 만들었다. 애쉬킨은 원자를 빛으로 포획하는 연구를 수행했었으나, 별 다른 성과가 없자 벨 연구소의 운영진들은 4년 전 그의 연구를 중단시켰다. 이 연구에 미련이 많았던 애쉬킨은 추와의 개인적인 대화 속에서 이 주제를 언급했고, 이는 추의 관심을 끌었다. 몇 달의 고민 끝에 추는 원자를 빛으로 포획하기 위해서는 우선 원자를 냉각시켜야 한다는 결론에 도달했다.

한 마디로 추는 연구소 동료와의 편안한 대화 도중에 연구 주제를 찾게 된 경우에 해당한다. 이는 매우 우연적인 사건처럼 보이지만, 실상 벨 연구소의 분위기가 이런 방식의 문제 찾기를 권장하고 있었던 것으로 보인다. 추의 회

36) 스티븐 추의 간략한 Biography와 노벨상 강연에 대해서는 다음을 참조하라. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1997/chu.html (노벨상 홈페이지, 2012. 1. 15. 접속); http://en.wikipedia.org/wiki/Steven_Chu (위키피디아, 2012. 1. 15. 접속)

고에 따르면, 1978년 벨 연구소에 처음 발을 들여놓았을 때, 벨 연구소는 추를 비롯하여 24명 정도의 젊고 자신만만한 젊은 과학자들을 뽑은 상태였다. 이 연구소는 그들에게 연구 이외에는 어떤 의무도 짊어지지 않았다. 대신, 이들 간의 활발한 상호작용이 가능하도록 연구소의 분위기를 조성했다. 연구소 공간 자체를 밀집되게 만들고 연구자들 각각의 방을 좁게 만들어서 연구자들이 밖으로 나와 서로 이야기를 나누면서 다른 연구자들의 연구 주제와 진행 과정을 알 수 있도록 만들었던 것이다. 이런 분위기 조성으로 인해 그들은 세미나 시간이나 이외에도 계속해서 연구에 대해 토론했다. 점심 시간에 시작된 토론은 식사 시간이 끝나고서도 계속 이루어졌고, 테니스를 치거나 파티를 하면서도 연구에 대한 토론은 지속되었다. 동료들과의 열띤 토론이 좋은 주제를 형성하는 데 일조했던 것이다.

이에 더해 벨 연구소에서 연구 초년차들에게 연구 주제를 탐색할 만한 충분한 시간을 제공해 주었던 것 또한 추의 연구 주제 형성 과정에서 중요한 역할을 했던 것으로 보인다. 추의 상사였던 피터 아이젠버거(Peter Eisenberger)는 연구소 초년생 추에게 처음 6개월 간은 도서관에서 보내면서 무엇을 할 지에 대해 여러 사람들과 이야기를 하라고 충고했다. 그 말에 따라 추는 벨 연구소에만 첫 해에 X선 현미경의 연구 현황에 대한 리뷰 페이지를 작성하면서 자신의 연구 주제를 탐색하는 데 시간을 할애했다.

벨 연구소의 운영진들은 연구비를 제공해 주고 연구자들이 불필요한 요식체계로 시간을 낭비하지 않도록 해 주었지만, 동시에 그 연구자들이 그냥 그런 연구에 만족하지 않도록 채찍질도 가했다. 첫 1년이 지나고 받은 심사에서 추는 그저 “좋은 연구”에 만족하지 말고, “새로운 분야를 시작하는 것”이 아니라면 그 어떤 것에도 만족하지 말아야 한다는 질책을 들었다. 이처럼 충분한 연구 주제 탐색 시간과 충분한 연구비, 연구 주제에 대한 높은 기준(새 분야 개척 주제), 벨 연구소의 이러한 조건들이 추가 좋은 연구 주제를 찾는 것을 자극하는 동력이 되었던 것으로 보인다.

원자 냉각 기술을 개발하는 데 성공한 후, 추는 이 기술의 적용 범위를 확장하는 방식으로 새로운 연구 주제를 형성했다. 벨 연구소를 떠나 스탠포드대학으로 옮긴 후, 그는 자신이 개발한 방법을 분자 생물학과 세포 생물학으로

까지 확장시켜 단일한 분자 수준에서의 생물계 연구로 그의 연구 주제를 이동시켜 나갔고, Bio-X 프로그램이라는 이름 아래, 생물학과 의학에 이 연구 기법을 이용하는 학제간 연구를 추진했다.

사실, 생물학과 의학 분야로 연구주제를 확장하고 이동해 나갔던 것 또한 동료였던 애쉬킨의 자극이 컸다. 1986년 애쉬킨이 추가 개발한 광학 원자 트랩이 물 속에 있는 조그만 유리구에도 작동한다는 것을 보여준 것이 계기가 되어, 추는 개별 DNA 분자들을 광학 핀셋으로 조작하는 연구를 시작하게 되었던 것이다. 이를 통해 그는 물 속에서 길게 늘인 형광 염색된 단일 DNA의 영상을 실시간으로 볼 수 있게 해 주는 연구를 내는 데 성공했다.

추의 연구 주제 형성 과정을 보면 동료와의 활발한 토론이 새로운 연구 주제 형성의 중요한 전환점이 되었음을 알 수 있다. 벨 연구소는 바로 그 점을 진작부터 깨닫고 그런 토론 문화가 나올 수 있도록 유도한 그런 장소였던 셈이다.

라. 앙드레 가임 (2010년 노벨 물리학상)³⁷⁾

앙드레 가임(Andre Geim, 1958-)은 소련 출신의 물리학자로 2010년 그래핀에 대한 연구로 노벨 물리학상을 수상했다. 가임의 그래핀 연구는 스카치 테이프라는 매우 일상적인 도구를 사용하여 이론 연구라는 점에서 세간의 주목을 받았다.

그에게 노벨상을 안겨 준 연구에서 볼 수 있듯이, 그의 연구는 ‘재간’으로 가득 차 있다. 강한 자기장 속에서 물이 공중에 떠 있는 ‘자기 공중부양(levitation)’ 현상의 발견이나 gecko라는 도마뱀붙이에 대한 연구도 그런 넘치는 재기의 결과물이었다. 그런 그의 재기는 소련의 열악했던 과학계의 상황과 그의 개인적인 품성이 결합된 결과였다.

앙드레 가임은 1958년 소련에서 태어나 그 곳에서 교육 받았다. 그가 대학

37) 가임의 Autography와 노벨상 강연에 대해서는 노벨상 홈페이지를 참조하라. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2010/geim.html (2012. 1. 15. 접속)

과 대학원을 다니던 시절, 소련 과학계는 옛 명성을 잃고 있었다. 실험 기자재는 너무나 낡았고 실험 재료도 부족했으며, 그런 환경 속에서 그는 이미 시류가 지나버린 주제, 그의 표현을 빌자면 ‘좀비 프로젝트’를 그의 박사 논문 연구로 수행했다. 이 쓰디 쓴 경험을 통해 그는 시의 적절한 연구 주제를 선택하는 것이 얼마나 중요한가를 깨닫게 되고, 자신의 박사 과정 학생들에게는 절대로 이런 죽은 연구 주제를 줘서 학생들을 고민하는 일이 없게 해야겠다는 결심을 하게 된다.

하지만, 소련의 후진적이었던 연구 제도가 가임에게 무조건 부정적으로만 작용하지는 않았다. 부실한 연구 환경 속에서 가임은 입수 가능한 자원들을 최대한 활용할 수 있는 연구 주제를 찾아내야 할 필요성과 그렇게 하는 방법을 익힐 수 있었던 것으로 보인다. 즉, 그는 자신의 연구 주제를 찾고 거기에 맞게 필요한 실험 기구와 실험 재료들을 조달하는 식이 아니라, 주변에 입수 가능한 실험 기구와 재료들이 무엇인지를 먼저 파악하고 그것으로 수행할 수 있는 연구 주제를 찾아내려 했던 것이다.

그의 이런 역량은 그가 자원이 풍부한 유럽의 과학계로 왔을 때 빛을 발휘하게 된다. 그의 유명한 ‘자기 공중부양(levitation)’ 연구는 대표적인 사례이다. 이 연구 당시 그가 속해 있던 연구소는 강력한 전자석을 자랑했다. 하지만 이 전자석은 세기가 너무 센 것이 오히려 문제였다. 그만큼 센 전자석은 가임의 연구에 쓸모가 없었으며, 더욱 실제적인 문제는 강력한 세기를 내기 위해 엄청나게 많은 전기를 필요로 했기 때문에 도시의 전기 수요가 적은 밤에나 사용할 수 있다는 점이였다. 연구소의 전자석에 별 관심이 없었던 가임이지만, 강력한 전자석의 효율도 보이고 자신의 연구가 연구소와 얼마나 잘 맞는지도 보일 겸 전자석을 이용한 연구를 계획하게 된다. 당시 그는 보통의 물질이 강력한 자기장 안에서 어떻게 반응하는가 하는 문제에 조금 관심을 가지고 있던 터라 그는 연구소의 전자석으로 간단하게 관련된 실험을 할 계획을 세웠다. 주변에서 쉽게 구할 수 있는 물을 가져왔고, 별 생각 없이 자석 구멍 안으로 물을 던졌다. 놀랍게도 물은 자석 구멍의 한 가운데서 멈춘 채 떨어지지 않았다. 그 다음 번엔 효과를 극대화하기 위해 개구리를 담은 물을 가져와 던졌고, 물과 함께 개구리는 공중에서 유명했다.

이 유명한 실험을 비롯하여 그의 많은 연구 결과들은 '금요일밤 실험(Friday night Experiment)'에서 나온 결과였다. 매주 금요일 밤 잠깐의 시간을 내어, 평소 궁금했으나 중심 연구 주제와는 거리가 멀어 관심을 두지 못했던 질문들에 대해 주변의 연구 자원들을 최대한 활용하여 간단한 실험들을 수행해 보는 것이다.

많은 경우 금요일밤 실험은 별다른 성과를 내지 못하고, 잠깐의 재미와 머리를 식히는 효과만 낸다. 하지만 가임은 '금요일밤 실험'이 다음과 같은 점에서 의미 있다고 생각한다. 첫째, 이미 많은 연구자들이 밀집해 있는 분야에서 새로운 현상을 찾아내는 것보다 새로운 실험 시스템을 도입하는 것이 더 보상이 크다. 그런 점에서 금요일밤 실험은 최저 비용과 최소의 노력으로 새로운 실험 시스템을 도입하려는 시도라고 볼 수 있다. 둘째, 그는 과학자들이 전문 분야에서 동떨어진 새로운 영역을 탐색할 때 흥미로운 결과가 나오기도 한다는 점을 강조한다. 이런 점에서 그의 실험은 '탐험적 우회(exploratory detour)'로서의 의미를 지니게 된다는 것이다.

마. 리처드 스몰리 (1996년 노벨 화학상)³⁸⁾

리처드 스몰리(Richard E. Smalley, 1943-2005)는 풀러렌이라는, 축구공 형태의 순수 탄소 결합체를 발견한 공로로 동료 연구자였던 로버트 컬(Robert Curl), 해롤드 크로토(Harold Kroto)와 함께 1996년 노벨 화학상을 수상한 미국의 화학자이다.

풀러린 발견으로 노벨상을 타기까지 스몰리의 연구의 핵심이자 장기는 다원자 분자의 회전을 생각시키는 데 있었다. 스몰리 연구의 진행 관점에서 본다면, 그의 연구는 풀러린의 발견을 위한 노정이었다기보다는 분자의 회전 생각 기술의 확장 과정에서 그 부산물로 풀러린이 발견되었다고 할 수 있을 정도이다. 그의 이런 연구 주제는 그가 박사후 과정을 시작했을 무렵에 처음 시작되

38) 스몰리의 Autobiography와 노벨상 강연에 대해서는 노벨상 홈페이지를 참조하라. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1996/smalley.html (2012. 1. 15. 접속)

었다.

1969년 프린스턴 대학 화학과의 박사 과정에 진학한 스몰리는 엘리엇 번스타인(Elliot Bernstein) 교수 밑에서 학위 과정을 시작했다. 당시 번스타인 교수는 분자의 순수한 단결정이나 혼합 단결정을 액체 헬륨에서 냉각시킨 후 광학적인 방식이나 마이크로웨이브를 이용하여 그 스펙트럼을 연구하고 있었다. 번스타인 교수 아래서 연구를 시작한 스몰리는 분자를 냉각시키는 방식의 연구 방법을 배우고, 이와 관련하여 응집상(condensed phase)와 분자 시스템에 관한 화학 물리(chemical physics)에 대해서도 많은 것을 배울 수 있었다.

1973년 여름, 스몰리는 시카고 대학의 도널드 레비(Donald H. Levy) 밑에서 박사후 과정을 시작했다. 레비 교수는 기체상(gas-phase) 자기 공명, NO₂와 열린 껍질(open-shell) 분자에 대한 Hanle 효과와 마이크로웨이브/광학 이중 공명 연구에서 뛰어난 성과를 보이고 있었고, 파장 가변 색소 레이저(tunable dye laser)를 이용한 분자 분광학 분야에서도 두각을 보이고 있었다.

레비의 연구팀에게 NO₂는 매우 중요한 연구 주제였다. NO₂의 광학 스펙트럼은 삼원자 분자로서 예상되는 것보다 훨씬 더 복잡해서 많은 분자 분광학자들에게 난제로 여겨졌다. 그런데, 새 레이저가 작동하는 500-640nm 범위에서 NO₂는 광범위한 흡수 스펙트럼을 나타냈다. 즉, NO₂는 분자 분광학자들의 도전의식을 불러일으키는 난제이면서 동시에 레비 팀의 연구 기술적 능력을 잘 보여줄 수 있는 주제였던 것이다. 스몰리가 시카고 대학에 도착하기 직전, 레비와 그의 학생은 새로운 레이저로 NO₂를 연구하는 데서 큰 진전을 보인 상태였다.

이런 점을 고려해 볼 때, 레비 팀에 합류한 스몰리가 NO₂에 주목을 하게 되었다는 점은 전혀 이상할 것이 없다. 그런데 그가 당장 NO₂ 연구에 뛰어들 수 없게 만드는 중요한 장애물이 있었다. 그것은 그가 프린스턴에서 쌓은 전공이 레비 팀의 전공 분야와는 달랐다는 점이었다. 다시 말하면, 그는 프린스턴에서 응집물질 분광학(condensed matter spectroscopy)을 전공했지만, 레비 그룹이 사용하고 있던 초고해상도 기체상 분광학(ultrahigh resolution gas-phase spectral technique)에 대해서는 아는 바가 많지 않았다. NO₂처럼 다원자 분자의 회전에 스핀까지 고려해야 할 경우, 이 분자의 스펙트럼의 해석은 엄청나게 복잡해진

다. 절대 영도 가까운 극저온에서 결정 격자에 얼어 있는 분자에 익숙한 스몰리 같은 사람에게 NO₂는 접근하기 어려운 분자였다.

스몰리에게는 다행스럽게도, 스몰리가 시카고에 도착했을 무렵 레비는 시카고를 몇 달간 떠나 있었다. 그 몇 달의 여유 시간동안, 스몰리는 프린스턴의 박사 학위 구두 시험을 준비했다. 당시 프린스턴의 박사 학위 최종 구두 시험에서는 세 편의 독창적인 연구 계획의 발표를 요구했다. 이 준비를 위해 스몰리는 시카고 대학 도서관에서 최신 화학 논문들을 읽으면서 연구 주제를 찾았다. 그 준비 중에 그는 유안 리(Yuan Lee, 1986년 노벨 화학상 수상자)와 스투어트 라이스(Stuart Rice)의 crossed beam reaction of fluorine with benzene에 관한 새 논문을 접하게 되었고, 그 논문에서 벤젠 분자 빔을 만드는 데 이용된 초음속 팽창(supersonic expansion)이 분자의 모든 회전 자유도를 냉각시킬 만큼 강력하다는 것에 주목하게 되었다. 스몰리는 자신이 분자의 회전에 대해 이해하기 어려우니까, 그 물리학을 이해하는 데 시간을 쏟느니 차라리 그 회전을 멈추어 버리게 하면 어떨까하는 생각을 하게 되었다. 시카고 대학의 연구 주제(NO₂)에 프린스턴의 접근법(냉각)을 접목시키는 생각을 해낸 것이다. 그해 가을, 프린스턴에 제출한 계획서에서 그는 이 생각을 구체화시켰다. 초음속 팽창으로 NO₂를 냉각시켜 단일 회전만을 남게 한 후, 이렇게 해서 가변 파장 색소 레이저로 단순해진 스펙트럼을 잡아낸다는 계획이었다. 하지만 당시까지 알려진 초음속 팽창 기술로는 충분한 냉각 상태를 얻기 힘들었으므로, 그는 연구 계획서에 전기 공명 “상태-선택자”(electric resonance “state-selector”)를 이용해 단일 회전 상태에 있는 분자들만을 골라내는 방법을 덧붙이면서 시카고의 레나드 와튼(Lennard Wharton)의 10m state-selector beam machine이 이 연구에 적합할 것이라는 의견까지 덧붙였다. 이처럼 스몰리는 자신이 속했던 연구실의 주제와 자신이 새로 속할 연구실의 접근법을 결합하여 새로운 연구 주제를 형성해냈다.

그 이후의 연구 과정을 보면 동료와의 협력 연구가 훌륭한 연구 성과를 내는 데 있어 얼마나 중요한지를 잘 보여준다. 그는 이 주제를 레비, 와튼과 함께 논의했다. 와튼은 그의 “상태-선택” 단계가 없이도 충분히 이 실험을 수행할 수 있다는 점을 보여주었고, 특히 그가 이미 만들어 놓은 실험 도구와 이

로부터 얻은 실험 결과를 통해 초음속 빔 소스로 충분할 정도의 냉각 상태를 얻을 수 있다는 점을 확신시켜 주었다. 와튼과의 협력 연구를 통해 1974년 8월 8일, 두 연구자는 NO₂의 스펙트럼을 얻을 수 있었고, 이 스펙트럼을 통해 원자나 이원자 분자에 대해서처럼 다원자 분자에 대해서도 세밀하게 연구를 할 수 있게 되었다. 또한, 두 사람의 협력으로부터 초음속 빔 레이저 분광학 연구가 시작되게 되었다.

1976년 라이스 대학(Rice University)으로 옮긴 스몰리는 또다시 협력 연구의 힘을 보여주었다. 그는 이 대학에서 레이저 분광학을 하고 있던 로버트 컬(Robert F. Curl)과 협력해서, 자외선 영역의 펄스 색소 레이저(pulsed dye laser)를 이용하여 벤젠과 같은 ‘보통의’ 분자의 스펙트럼으로까지 그 연구의 범위를 확대하게 된다. 그 후 결국 탄소 60개만으로 이루어진 분자를 발견하고 이 분자의 형태가 축구공 모양의 풀러렌이라는 것을 제안한다. 한 마디로, 스몰리는 각기 다른 연구법의 융합과 동료와의 협력을 통해 자신이 가진 자원을 최대한 활용하는 방향으로 연구 주제를 형성해 나간 사례라고 하겠다. 그리고 풀러렌의 노벨상 수상자들은 최초의 발견만이 노벨 위원회의 인정을 받는다는 예로서도 중요하다. 스몰리에 의한 풀러렌 연구결과의 발표는 당초 학계에 별로 주목을 받지 못하였다. 그러나 1991년 도널드 호프만(Donald Huffman)과 볼프강 크래쉬머(Wolfgang Kraschmer)에 의하여 고체가루 형태로 다량의 시료를 합성하는 방법이 고안된 이후 풀러렌 연구는 학계의 폭발적인 주목을 받았고 나노기술의 총아가 되었다. 그러나 노벨위원회는 처음 풀러렌의 존재를 발견한 스몰리를 포함한 오직 세 학자에게 노벨상을 수여하였다.

바. 오사무 시모무라 (2008년 노벨 화학상)³⁹⁾

오사무 시모무라(Osamu Shimomura, 1928-)는 일본 출신의 생화학자로, 녹색 형광 단백질(Green Fluorescence Protein, GFP)을 발견하고 이를 이미징에 응용한

39) 오사무 시모무라의 Autography와 노벨상 강연에 대해서는 노벨상 홈페이지를 참조하라. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2008/shimomura.html (2012. 1. 15. 접속)

공로로 마틴 찰피(Martin Chalfie)와 로저 쨌엔(Roger Y. Tsien)과 함께 2008년 노벨 화학상을 수상하였다.

1928년생인 시모무라는 2차 세계대전과 그 직후의 매우 혼란스러운 시기에 일본에서 고교와 대학시절을 보냈다. 그는 나가사키에 원자폭탄이 투하될 당시 나가사키로부터 불과 25Km정도 되는 곳에 살았기 때문에 원자폭탄의 화염 빛을 경험하기도 했다고 회고했다. 전쟁 후 나가사키 의학대학(현 나가사키대학)의 약학부에 입학하여 1951년에 졸업한 후 1955년까지 야스나가(Shungo Yasunaga) 교수의 도움으로 분석화학실험실 조교로 일했다. 그 후 야스나가 교수의 소개로 나고야 대학의 유기화학전공 히라타(Yoshimasa Hirata) 교수의 연구학생으로 일을 하면서 일본 해안가에 매우 흔한 갑각류 동물인 Cypridina에서 발광화합물인 루시페린(Luciferin)을 추출하는 일을 하게 된다. 이 화합물은 매우 불안정해서 그 동안 안정한 고체형태로는 추출한 적이 없는 화합물이었는데, 시모무라는 10개월에 걸쳐 매우 열심히 연구한 결과 이를 결정으로 만드는 데 성공하였고 1957년 첫 논문을 발표하였다. 이를 계기로 시모무라는 1959년 미국 프린스턴 대학의 프랑크 존슨(Frank H. Johnson) 교수로부터 연구실의 연구원 자리를 제안을 받게 되었다. 당시 그는 박사과정 학생이 아니었지만 히라타 교수의 배려로 프린스턴 대학으로 떠나기 직전인 1960년 루시페린 연구로 박사학위를 받게 된다.

프랑크 존슨 교수는 시모무라에게 형광해파리 Aequorea의 형광을 내는 화합물을 분리하는 연구를 제안하고, 1961년부터 태평양 연안 Friday harbor에서 잡히는 해파리로부터 형광 화합물을 추출하고 분리하는 연구를 하게 된다. 그는 결국 1962년 2월 5mg의 형광물질을 순수한 형태로 만들었는데 그것은 단백질이었고 이름을 aequorin이라고 부친다. 이 물질은 산소가 없는 상태에서도 칼슘이온이 존재하면 빛을 발하는 특이한 단백질로서 첫 번째 발광단백질로 주목을 받았다. 그런데 이 단백질을 더욱 순수하게 만들기 위하여 관 크로마토그래피 분리를 하는 과정에서, 시모무라는 아주 미량의 녹색형광을 띄는 물질을 발견하였고 이를 녹색형광단백질(GFP)라고 이름 붙였다. 후에 aequorin은 생체의 칼슘을 감지하는 센서로 활용되기 시작하는데 시모무라는 이 물질의 발광 반응을 이해하기 위한 연구를 계속하여 1979년에 GFP의 발색단(Chromophore)을

밝히게 된다. 이후 많은 학자들의 후속 연구를 통해 이 단백질을 원하는 위치에서 발현시키는 유전자를 삽입할 경우 세포내의 원하는 화합물에 형광을 발하게 할 수 있음을 알게 되었고, 또한 다양한 색의 형광 단백질을 만들어 냄에 따라 생체 이미징 기술에 획기적인 발전을 가져왔다.

시모무라는 연구주제를 자기가 선택하였기보다는 지도교수가 지정해 주었다고 볼 수 있다. 그렇지만 그는 지정한 일에 대한 애착과 열정으로 노벨상 업적의 성과를 내었다. 결국 주어진 상황에서 최선을 다한 것이 좋은 결실을 가져왔다고 볼 수 있다. 또 다른 운은 시모무라가 당초 생체형광물질 연구의 권위자라고 할 수 있는 지도교수인 프랑크 존슨 교수(1908-1990)가 이미 죽었기 때문에 노벨상의 행운을 가져갔다고도 볼 수 있다.

사. 로저 쩌엔 (2008년 노벨 화학상)⁴⁰⁾

로저 쩌엔(Roger Y. Tsien, 1952-)은 미국 출신의 생화학자이다. 그는 마틴 찰피(Martin Chalfie)와 오사무 시모무라(Osamu Shimomura)와 함께 녹색형광 단백질(Green Fluorescence Protein, GFP)을 발견하고, 이를 이미징에 응용한 공로로 2008년 노벨 화학상을 수상하였다.

쩌엔은 중국 이민 2세로서 과학기술자 집안에서 태어났다. 그는 1972년 하버드 대학에서 분자생물학 전공한 뒤, 1977년 케임브리지 대학에서 생리학전공으로 박사학위를 받는다. 그 후 케임브리지 대학에서 연구원 생활을 하다가 1982년 UC 버클리 대학의 교수가 되었고 1989년 UC 샌디에고(UCSD) 대학의 교수로 자리를 옮긴다.

쩌엔은 과학기술자 집안에서 자란 덕분에 어릴 적부터 집에서 화학실험을 할 수 있었다. 그는 학위과정 동안 신경생리학에 관심을 가지면서 매우 미량의 변화를 정량화함으로써 신경활동전위를 관찰할 수 있는 염료화합물에 관심을 갖는다. 특히 박사학위과정 때부터 신경전달과 관련된 칼슘이온을 관찰할

40) 로저 쩌엔의 Autobiography와 노벨상 강연에 대해서는 노벨상 홈페이지를 참조하라. http://www.nobel-prize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2008/tsien.html (2012년 1월 15일 접속)

수 있는 방법에 관심을 갖게 된다. 그리고 버클리 대학에 있는 동안 칼슘이온을 관찰하는 형광염료 연구를 수행하여 좋은 성과를 낸다.

그러나 그는 더 좋은 연구 환경을 위하여 UCSD 대학으로 옮기게 되는데 그 직전에 버클리 대학의 동료 교수로부터 시아노박테리아등에서 발견되는 광합성색소로 구성된 Phycobiliprotein에 관한 연구를 듣고 흥미를 느끼게 된다. 특히 그것의 유전자로부터 만들어진 apoprotein(발광단백질에서 발색단을 제거한 단백질)이 발색단과 혼합하면 다시 형광을 낸다는 것이었다. 대학을 옮긴 후 더 좋아진 연구 환경에서 칼슘 이온 이외에 세포내에 중요한 화합물을 정량하기 위한 다양한 분광정량법을 연구하게 된다. 그런데 1992년 우연히 Medline(현재 세계적으로 가장 큰 의학관련 논문 서치 DB)에서 Green Fluorescence Protein을 검색하다가 당시 막 발표되었던 프레셔(Douglas Preshler)의 GFP의 유전자 구조에 관한 논문을 발견하게 된다. 짜옌은 당시 우즈홀 해양연구소(Woods Hole Oceanographic Institution)에 있었던 프레셔에게 연락했는데, 마침 프레셔는 연구비 지원이 끊어져 더 이상 연구할 수 없게 되었다며 짜옌에게 그 동안 연구결과를 모두 넘겨주게 된다. 짜옌에게는 더 없는 행운이었다. 이러한 행운에 힘입어 짜옌은 유전자를 조절하여 다른 색의 형광을 발하는 형광단백질들을 만들고 이를 세포 이미징 기법으로 발전시켜 노벨상을 수상하게 된다.

짜옌은 매우 우수한 학자라고 할 수 있을 것 같다. 그는 대학시절에 관심을 갖게 된 분야를 지속적으로 발전시키는 과정을 거쳐 훌륭한 연구주제를 갖게 되었고 훌륭하게 해결하게 되었다. 그 과정에서 역시 동료와의 대화, 그리고 운도 역시 부분적으로 작용을 한 것 같다.

아. 조지 펄라디 (1974년 노벨 생리의학상)⁴¹⁾

조지 펄라디(George E. Palade, 1912 - 2008)는 루마니아 출신의 미국 세포생물학자이다. 그는 전자현미경을 이용하여 세포생리학의 토대를 놓은 공로를

41) 펄라디의 Autography와 노벨상 강연에 대해서는 노벨상 홈페이지를 참고하라. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1974/palade.html (2012. 1. 15. 접속); http://en.wikipedia.org/wiki/George_Emil_Palade (위키피디아, 2012. 1. 15. 접속).

인정받아 동료인 알베르트 클로드(Albert Claude) 그리고 크리스티앙 뒤브(Christian de Duve)와 함께 1974년 노벨 생리의학상을 수상했다.

세포가 발견된 지 수백 년이 흐른 20세기 초까지도 세포의 내부는 여전히 미지의 영역으로 남아있었다. 그 미지의 영역에 빛이 비치기 시작한 것은 광학현미경보다 훨씬 높은 배율을 자랑하는 전자현미경이 발명된 1930년대 이후였다. 펠라디와 그의 동료들은 세포분획법, 전자현미경절편 제작법 등 전자현미경을 이용해 세포 내부를 관찰할 수 있는 표준적인 방법들을 개발하고, 이를 통해 세포 소기관들의 구조와 기능을 규명하여 세포생리학의 가장 기초적인 토대를 놓았다.

본래 의대에서 해부학을 공부했던 펠라디가 세포생리학이라는 주제에 관심을 가지게 된 건 우연한 기회 덕분이었다. 루마니아에서 박사학위를 받은 그는 2차 대전이 끝난 직후 미국으로 건너가 뉴욕대학의 한 실험실에 있었는데, 그 무렵 뉴욕대학에 온 클로드의 강연을 듣게 되었다. 당시 클로드는 전자현미경을 이용한 세포 내부 구조 연구를 막 시작한 참이었고, 그날 강연도 그와 관련된 주제로 이뤄졌다. 클로드의 강연을 들은 펠라디는 이제 막 시작된 전자현미경을 이용한 세포 연구에 단번에 매료되었다. 루마니아에 있을 때부터 현미경을 이용한 조직연구에 관심이 많았던 그는 전자현미경이 생물학의 새로운 장을 열어줄 것임을 직감했기 때문이다. 강연이 끝난 뒤 펠라디는 클로드를 찾아가 짧은 대화를 나누었고, 운 좋게도 클로드로부터 함께 연구해보지 않겠냐는 제안을 받았다. 펠라디로서는 거절할 이유가 없었다. 그는 곧장 짐을 싸서 클로드가 있던 록펠러 연구소로 자리를 옮겼다.

우수한 연구자들에 더해 충분한 연구비까지 제공되었던 록펠러 연구소는 펠라디에게 자유로운 연구 환경을 제공했다. 이제 막 미지의 분야에 발을 들여놓은 펠라디가 해야 할 일은 무궁무진했다. 이런 상황에서 그는 일명 ‘록펠러 그룹’이라고 불린 연구모임을 결성하고 동료들과의 자유로운 대화를 통해 시급하고 중요한 연구 주제들을 찾아내어 그것들을 함께 해결해나가기 시작했다. 예컨대, 병리학 분과에 있던 머피(James Murphy), 호지봄(George Hogeboom), 슈나이더(Walter Schnider), 포터(Keith Porter) 등과 함께 세포 조직을 균질하게 분획할 수 있는 방법을 개발했고, 포터와 함께 전자현미경절편제작 방법과 조

직 고정법을 개량하여 미토콘드리아와 리보솜을 관찰하기도 했다. 전자현미경을 이용한 세포 구조 연구가 중요한 성과를 내기 시작하면서 록펠러 연구소의 펠라디 실험실은 전자현미경을 이용하여 세포연구를 하고자 하는 연구자들의 훈련센터가 되었다. 많은 연구자들이 몰려오자 펠라디의 실험실은 큰 명성을 얻었음은 물론, 자유롭게 연구할 수 있는 충분한 연구비와 함께 연구할 수 있는 훌륭한 연구자들도 확보할 수 있었다. 펠라디는 록펠러 연구소를 세포생리학 연구의 메카로 만듦으로써 많은 신진 학자들을 록펠러 연구소로 끌어 모으는 데 성공한 것이다.

펠라디가 ‘록펠러 그룹’을 이끌고 많은 젊은 생물학도들을 세포생리학 분야로 끌어들이 수 있었던 데에는 중요하면서도 흥미로운 연구 주제를 찾아내고 그것의 중요성을 다른 연구자들에게 전달하는 데 능했던 그의 소통 능력이 크게 한 몫 했을 것이다. 펠라디의 제자이자 1999년에 노벨 생리의학상을 수상한 귄터 블로벨(Gunter Blobel)의 다음과 같은 언급은 이런 예상에 힘을 실어준다. “펠라디 선생님은 길고 지루한 세미나를 갑자기 흥미롭고 활기차게 바꿔놓을 만큼 놀랍도록 단순하고 일관된 개념을 제시했다. 그는 자신의 작업가설을 아주 쉽게 표현하여 사람들을 그의 창조적인 연구에 적극적으로 참여시켰다. 그것은 테니스의 아름다운 서브와 같다. 독백이 아니라 대화라는 점에서.” 블로벨의 말은 펠라디의 성공 요인을 매우 잘 보여준다. 펠라디는 문제의 핵심을 정확하게 파악할 줄 알았고, 그것을 다른 사람에게 단순하고 쉽게 전달할 수 있는 능력도 가지고 있었다. 이러한 능력은 중요한 연구 주제가 무엇인지를 찾아내는 데는 물론, 자신이 하고 있는 연구가 얼마나 중요하고 독창적인지를 남들에게 설득하는 데도 매우 효과적이었을 것이다.

뿐만 아니라, 그는 자신의 영역으로 모여든 연구자들을 효율적으로 조직하여 체계적인 연구를 수행하는 데도 뛰어난 재능을 보였다. 펠라디가 이룬 성과가 이것을 잘 보여준다. 1970년대에 이르러 록펠러 연구소는 명실상부 전자현미경을 이용한 세포생리학 연구의 선도적 연구기관이 되었고, 그 무렵 록펠러 연구소에는 적어도 다섯 개의 세포생리학 실험실이 있었다. 록펠러 연구소의 세포생리학 연구가 어느 정도 궤도에 올랐다고 생각한 펠라디는 이제까지 축적된 세포생리학 연구를 의학에 적용할 때가 왔다고 판단하고 노벨상을 받

기 1년 전인 1973년에 예일대학 의과대학으로 자리를 옮겼다. 펠라디의 능력은 예일대학에서도 변함없이 발휘되어 그가 세팅한 의과대학의 세포생리학과는 얼마 되지 않아 미국 최고의 세포생리학 학과 중 하나가 되었다.

펠라디의 사례는 새로운 분석 기구를 적용하는 것이 좋은 연구 주제를 찾아내는 중요한 방법이 될 수 있다는 사실을 보여주는 동시에 오늘날의 과학 활동에서 동료들과 소통할 수 있는 능력이 얼마나 중요한 지를 잘 보여준다.

자. 도네가와 스스무 (1987년 노벨 생리의학상)⁴²⁾

도네가와 스스무(Tonegawa Susumu, 1939-)는 일본의 분자생물학자이자 면역학자이다. 그는 항체생성의 유전학적인 원리를 규명한 공로를 인정받아 1987년 일본인 최초로 노벨 생리의학상을 단독으로 수상했다.

세상에는 수많은 종류의 항원이 존재한다. 항원이란 병원균이나 독성물질 같이 인체에 해를 끼칠 수 있는 외래 물질을 총칭한 것으로, 우리 인체는 항원이 가진 독성을 중화시킬 수 있는 항체를 만들어냄으로써 항원으로부터 우리 몸을 보호한다. 그런데 한 종류의 항체는 한 종류의 항원만 중화시킬 수 있으므로 만약 항원의 종류가 1억 개라면 항체를 만드는 유전자 역시 1억 개가 존재해야 한다. 그러나 전체 유전자의 양을 생각할 때 항원의 종류만큼 항체 유전자가 존재하는 것은 불가능하다. 그렇다면 우리 몸은 어떤 방법으로 수많은 종류의 항체를 만들어내는 것일까? 면역학의 오랜 난제로 남아있던 이 문제를 해결한 인물이 바로 도네가와 스스무이다.

사실 도네가와와는 면역학에 관심이 없었다. 젊은 시절 그를 매료시킨 것은 1960년대 당시에 유망한 분야로 각광받고 있던 분자생물학이었다. 분자생물학을 전공하기로 결심한 도네가와와는 교토대학의 바이러스 연구소에 대학원생으로 입학했으나 지도교수였던 와타나베(Itaru Watanabe) 교수의 권유에 따라 미국으로 유학을 떠나 1963년에 U.C 샌디에고 대학의 생물학과에 입학했다. 5년 뒤인 1968년 바이러스의 전사 조절에 관한 연구로 박사학위를 받은 그는 1년

42) 도네가와 스스무에 대한 Autography와 노벨상 강연에 대해서는 노벨상 홈페이지를 참조하라.
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1987/tonegawa.html (2012. 1. 15. 접속)

간 U.C 샌디에고 대학의 하야시(Masaki Hayashi) 교수 실험실에 머무르다가 이듬해 솔크 연구소로 자리를 옮겼다. 당시 솔크 연구소에는 돌베코(Renato Dulbecco)라는 뛰어난 바이러스 유전학자의 실험실이 있었다. (돌베코는 1975년 중앙바이러스와 세포유전물질의 상호작용에 관한 연구로 노벨 생리의학상을 받았다.) 돌베코의 실험실에는 전 세계에서 몰려온 일류 박사후 연구원들이 가득했는데, 도네가와도 그들 중 한 명이었다. SV40이라는 바이러스의 전사 기작을 연구하던 도네가와에게 진취적이었고 자유로운 돌베코의 실험실은 최상의 연구 환경을 제공했다.

그러나 도네가와는 돌베코 실험실에 오래 머물러 있을 수 없었다. 비자가 1970년 말에 만료되었기 때문이다. 도네가가가 새로 비자를 발급받아 다시 미국에 머물 수 있기 위해서는 최소한 2년 동안 미국을 떠나 있어야 했다. 도네가가는 몇 가지 가능성을 생각해보았지만 딱히 흥미를 끄는 것은 없었다. 그러던 와중에 돌베코로부터 한 통의 편지를 받았는데, 거기에는 스위스 바젤에 막 세워진 바젤 면역학 연구소로 가는 게 어떻겠냐는 제안이 담겨 있었다. 도네가가는 면역학에 대해 아는 바도 별로 없고 관심도 별로 없었지만 돌베코의 선견지명을 믿고 바젤 연구소행을 결심했다.

결과적으로 도네가와의 바젤 연구소행은 그가 일생동안 누린 행운 중 가장 큰 것이었다. 도네가가는 2년 계약으로 바젤 연구소에 갔으나 처음에는 그곳에 잘 적응하지 못했다. 돌베코 실험실에서 연구하던 SV40 바이러스에 대한 미련을 버리지 못했기 때문이다. 하지만 이내 홀로 SV40 바이러스를 연구하는 것은 현명한 것이 아님을 깨닫고 흥미로운 주제를 발견할 수 있기를 희망하며 바젤 연구소에 있던 면역학자들과 활발하게 교류하면서 본격적으로 면역학 공부를 시작했다.

1971년 말 도네가가는 드디어 자신이 몰두할 수 있는 흥미로운 주제를 찾아냈다. 그것은 당시 면역학계에서 가장 논쟁적인 주제 중 하나였던 '항체 다양성의 유전적 기원'에 관한 문제였다. 분자생물학의 최신 성과들을 잘 알고 있었던 그는 자신이 그 문제를 해결하는 데 중요한 공헌을 할 수 있을 것임을 직감했다. 도네가가가 항체 다양성의 문제를 해결하는 데 적용할 수 있을 것이라고 기대했던 분자생물학의 최신 성과는 '제한효소'와 '재조합 DNA'였다.

그는 우선 연구팀을 꾸렸다. 맨 처음 그의 연구팀에는 몇 명의 테크니션만 있었지만, 곧 우수한 포닥 연구자들이 그의 연구팀에 합류하기 시작했다. 특히 유전학자였던 찰스 슈타인버그(Charles Steinberg)는 훌륭한 동료이자 조연자가 되었다.

도네가와는 항체 다양성에 관한 가설들 중 가장 유력한 드레이어-베넷(Dreyer-Bennett) 가설을 검증하는 것을 연구의 출발점으로 삼았다. 항체는 항체마다 모양이 다른 V영역과 어떤 항체에서나 동일한 모양인 C영역으로 구성되어 있다. 드레이어-베넷 가설에 따르면, 항체 유전자는 C 유전자와 다수의 V 유전자로 구분되어 있으며, 하나의 항체가 만들어질 때는 C 영역의 유전자와 V영역의 유전자 사이에 재조합이 일어난다. 도네가와는 이 가설을 검증하기 위해 태아 생쥐의 유전자와 골수종에 걸린 생쥐 유전자를 비교하는 실험을 고안했다. 만약 드레이어-베넷 가설이 옳다면, 아직 항체를 만들어내지 못한 태아 생쥐의 V 유전자와 C 유전자는 서로 떨어져 있을 것이고, 항체를 계속 생산하고 있는 골수종에 걸린 생쥐는 재조합을 통해 만들어진 항체 유전자를 가지고 있을 것이다.

도네가와와 그의 검증 실험에는 당시 분자생물학의 최신 기술이 모두 동원되었다. 그것은 1) 제한 효소를 이용한 DNA 재조합 2) DNA 클로닝법 3) DNA 염기서열을 읽을 수 있는 맥섬-길버트법 등이었다. 도네가와와 그의 연구팀은 최신 분자생물학 기술이 발표될 때마다 그것을 빠르게 습득하여 자신의 실험에 적용했으며, 심지어 어떤 때는 논문으로 발표되기 전에 정보를 알아내기도 했다. 이는 도네가와가 자신의 연구에 필요한 분자생물학적 기술이 무엇인지를 정확히 알고 그것을 적극적으로 찾았기 때문에 가능한 것이었다. 면역학의 문제를 해결하기 위해 최신의 분자생물학 기술을 도입한 도네가와와 그의 연구팀은 독창적인 연구를 위해서는 분과를 넘어서서 사유할 수 있는 능력이 필요함을 시사한다.

실험을 시작한지 약 2년이 지난 1976년 초 도네가와와 그의 연구팀은 항체 유전자가 재조합에 의해 만들어진다는 결정적인 증거를 포착했다. 드레이어-베넷 가설이 10년여 만에 검증된 것이다. 바젤 연구소의 소장인 닐스 예르네(Niels Jerne)는 도네가와와 그의 연구팀의 성과가 면역학계는 물론 분자생물학계에도 매우 중요한 것임을 알아챘다. 예르네의 도움 덕분에 도네가와와 그의 연구팀은 1976년 미국 콜드스프링하버

연구소 심포지엄에 발표자로 초청되었다. 이 심포지엄에 초청된다는 것은 분자생물학자로서 누릴 수 있는 최고 영예 중 하나였다. 발표는 큰 성공을 거두었고, 도네가와는 36살이라는 젊은 나이에 면역계와 분자생물학계 양쪽에서 높은 명성을 얻게 되었다.

하지만 도네가와는 이에 만족하지 않고 연구를 계속했다. 항체가 유전자 재조합을 통해 만들어진다는 것은 증명되었지만, 항체 수만큼 V 유전자가 있다는 트레이어-베넷 가설로는 항체 다양성을 설명할 수 없다고 생각했기 때문이다. 그는 실험을 거듭하여 V 영역이 V, D, J 등 서로 분리된 세 종류의 유전자 재조합에 의해 만들어진다는 사실을 발견했다. 도네가와는 드디어 우리의 몸이 복수의 유전자를 이용하여 그것들을 재조합함으로써 수많은 항원에 대응할 수 있을 만큼의 다양한 항체를 만들어낸다는 사실을 밝혀낸 것이다. 이 발견으로 항체 다양성의 비밀에 관한 면역학계의 오랜 논쟁은 완전히 해결되었다. 그것은 도네가와가 바젤 면역학 연구소에 온 지 약 10년 만에 이룬 성과였다.

도네가와와 사례는 자신이 잘 알고 있는 분야의 지식과 기술을 적용할 수 있는 분야를 찾아내는 것이 우수한 연구 주제를 찾아내는 좋은 방법이 될 수 있음을 보여준다. 뿐만 아니라, 이 사례는 성공적인 융합연구를 위해서는 두 분야 모두를 잘 아는 것보다는 한 분야 내에서는 해결하기 어려운 문제를 찾아내고 그것을 해결할 수 있는 방법을 다양한 곳에서 끌어올 수 있는 능력이 중요하다는 점도 일깨워준다.

차. 피터 도허티 (1996년 노벨 생리의학상 수상)⁴³⁾

피터 도허티(Peter C. Doherty, 1940-)는 인체 내 세포 면역체계가 외부에서 침입한 오염된 미생물 병원체를 인식하는 메커니즘을 규명한 공로로 1996년

43) 도허티의 Autography와 노벨상 강연에 대해서는 노벨상 홈페이지를 참조하라. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1996/doherty.html (2012. 1. 15. 접속). 도허티의 자전적 에세이인 다음의 책도 참조하라. 피터 도허티, 류운 역, 『노벨 생리의학상 수상자 피터 도허티 교수의 노벨상 가이드』 (알마, 2008)

롤프 징커나겔(Rolf M. Zinkernagel)과 공동으로 노벨상을 수상하였다.

호주 브리즈번 옥슬리 교외 외곽의 노동계층 출신의 도허티는 대학교육을 받는 사람이 거의 없었던 당시 우연히 퀸즐랜드 대학 수의학부에서 개최한 “일반인 공개강의”를 듣고 수의학을 전공하기로 결심했으며, 특히 병리학에 관심을 가졌다. 그는 대학을 졸업한 후 수의사로 개업하지 않고 소, 돼지, 닭, 양의 감염성 질병을 연구했는데, 이후 스코틀랜드의 에든버러 대학에서 도약병 뇌염(Louping Ill Encephalitis) 연구로 박사학위를 받았다. 이 병은 양에게서 나타나는 것으로 진드기의 일종에 물려 감염되는 바이러스성 뇌염을 말한다.

그는 학위를 마친 뒤 호주로 돌아온 도허티는 연방과학산업연구기구 소속의 수의학연구원이 되고자 했지만, 잠시 동안만 일할 생각으로 호주국립대학의 존거티의학연구소(JCSMR)에서 세포매개성 면역에 대하여 공부를 하게 된다. 이 과정에서 그는 1972년 바이러스에 대한 숙주의 반응을 더 잘 이해하게 되었다. 뿐만 아니라 실험용 생쥐의 바이러스 감염에 관한 실험을 시작하면서 처음으로 역동적이고 지적인 분위기가 충만한 기초의학 연구 환경을 경험하고 여기에 매료되었으며, 그 이후로 다시는 수의학계로 돌아가지 않고 기초의학의 면역학자의 길을 가게 된다.

도허티는 1973에서 1975년 사이에 롤프 징커나겔과 함께 실험결과를 설명하기 위한 이론적인 틀을 개발하였는데 결국 이 연구결과가 중요한 공헌으로 인정을 받게 되어 노벨상을 공동수상하게 된다. 도허티는 자신의 경험을 토대로 가장 과학다운 과학이란 결국 훌륭한 탐정이야기와 같다고 주장한다. 탐정이야기처럼 과학도 물음을 던지고, 실마리를 추적하고, 숨겨진 사실을 밝혀내면서 어떤 결론에 도달하거나 거기서 그치지 않고 어떤 해법에까지 도달한다는 것이다. 과학자도 탐정과 마찬가지로 가장 중요한 일 중의 하나가 ‘심문(審問)’이다. 대부분의 노벨상은 자연 자체를 심문하는 ‘치밀한’ 과학자에게 돌아간다. 과학자가 사용하는 고전적인 심문기법은 실험이다. 그리고 보통 수사처럼 첫 단계는 바로 올바른 물음을 던지는 것이다. 그리고 도허티는 어떤 물음이 올바른 물음인지를 깨닫게 하는 통찰은 생각하는 데 온 시간을 바치는 이론가들의 글을 읽거나 그들과 직접 대화를 나누는 과정에서 나올 수도 있다고 주장한다. 또한 그는 발견이 이루어질 때마다 더 많은 물음들이 생겨나고, 그 물음들이

계속해서 실험을 이끌어간다고 주장한다. 즉 재미있는 것과 알 거리를 찾아가는 인간의 여타 다른 활동과 마찬가지로 과학 연구도 전체적으로 훌륭한 이야기를 맞춰나가는 것과 관련이 있다는 것이다. 그리고 만일 연구팀이 운도 따르고 실력이 있다면 완성된 이야기는 참신함과 재미를 갖추어 학계에서 주목하는 우수한 연구결과가 된다는 것이다. 그러나 시작은 기대를 던져주었으나 진부하고 지루한 결론으로 끝나는 경우도 흔히 있고 더군다나 많은 연구 결과는 아직 ‘증거 불충분’ 단계에 머물러 있다고 도허티는 주장한다. 요약하면, 도허티는 자연을 탐구하는 연구의 과정을 마치 탐정이 범 죄를 수사하는 과정과 비유하면서, 초기에 올바른 물음을 던지기 위해서는 실험을 하는 학자들도 이론가들과 대화하거나 글을 읽어야 하고, 해결하고자 하는 문제에 대하여 지속적으로 심문해야 한다고 주장한다. 도허티는 그가 쓴 『노벨상 가이드』라는 자전적 책의 9장에서 노벨상 받는 법의 팁을 제안하고 있는 데 소개하면 다음과 같다.⁴⁴⁾

- 명쾌하고 간결하게 쓰는 법을 익혀라
- 적절한 분야에서 일하라
- 진정한 열정을 찾아내 계발하라
- 집중하되, 도락가가 되지 마라
- 연구할 곳을 신중하게 선택하라
- 증거를 중히 여기고, 등잔 밑을 보는 법을 익혀라
- 생각을 틀에 가두지 마라
- 문제를 입 밖에 내라
- 거짓을 말하지 마라
- 마음을 넓게 가지고, 문화적으로 깨어 있어라
- 좌절하지 말고 뜻을 굳건히 하되, 실패할 준비도 하라
- 시간은 소중하다
- 일류 경영자 자리는 피해라
- 오래 건강하게 살아라
- 즐겨라. 승자처럼 행동해라

44) 피터 도허티, 『노벨상 가이드』 (알마, 2008), 9장 참조.

3. 우수 연구 문제 형성을 위한 제언

앞서 살펴본 10명의 노벨과학상 수상자들은 제각각 다른 분야에서, 제각각 다른 문제들을 다른 방법으로 해결했다. 즉, 개인적 배경의 차이와 그들의 연구 분야의 특성의 차이 때문에, 연구 주제를 만든 세세한 과정에는 차이가 있다. 하지만 그런 차이 속에서도, 좋은 연구 문제 형성 과정에 영향을 미친 몇 가지 공통 요소들을 추출해 낼 수 있다. 이 공통 요소들을 좋은 문제 형성을 위한 팁의 형태로 정리하면 다음과 같다.

Tip 1. Big Question과 연결이 중요하다.

좋은 문제의 중요한 기준 중의 하나는 문제가 관련 분야에서 중요시하는 Big Question 해결에 얼마나 기여할 수 있는가 하는 것이다. 이런 Big Question은 누구나 무엇이 문제인지를 분명히 알고 그 해결을 시도하려 했으나 실패한, 루트벤스타인의 표현을 빌리자면, ‘알려진 무지’의 영역에 해당하는 경우가 많다. 따라서 이런 Big Question 해결에 기여했을 경우 그 연구의 중요성에 대해서는 별다른 이의가 제기되지 않을 것이다.

오늘날처럼 전문화가 심화되어 가는 상황 속에서 Big Question의 중요성은 더욱더 커지고 있다. 이 질문들은 파편화 되어 가는 분야를 묶어 주고 파편화 되어 가는 지식들을 퍼즐의 제 자리에 맞춰서 각각의 지식들이 커다란 그림을 그려나갈 수 있게, 즉 각각의 지식들이 상호적인 시너지 효과를 가져 올 수 있게 해 주기 때문이다.

그런데, 각각의 연구자들이 각자의 전문 분야에서, 그보다도 더 좁은 질문을 가지고 연구를 하는 상황에서는 이런 Big Question을 놓치기 쉽다. 구체적이고 좁은 문제에 집중하다가 전체적인 시야를 놓치게 되는 것이다. 이렇게 전체적인 시야를 놓치게 되면 거기에서 나온 연구 결과의 의미도 협소하게 해석될 수밖에 없다.

Big Question과의 연결을 통해 문제를 형성해 가는 과정은 양방향적이라고 할 수 있다. 그 한 방향은 Big Question에 있는 문제가 무엇인지를 파악하고 그

문제를 해결할 수 있는 방향을 찾아나가는 것이다. 이는 큰 주제를 형성해 내기는 쉽지만 구체적인 문제로 형성해 가는 과정은 어렵고, 또 구체적인 문제가 분명하게 드러나 있는 경우에는 다수의 연구자들이 뛰어들어 상대적으로 경쟁이 심하다는 난점을 안고 있다. 다른 방향은 연구자가 가진 질문을 Big Question과 연결시켜 나가는 것이다. 대부분의 연구자들은 이미 자신의 전문성과 가용할 수 있는 연구 자원이 한정되어 있어서 Big Question이 무엇인지를 안다고 해도 곧장 그 문제에 뛰어들기 힘든 것이 현실이다. 그런 점을 인정하더라도, Big Question을 남의 문제인 양 무시하지는 말아야 한다. 자신이 현재 안고 있는 질문이 어떻게 Big Question에 연결될 수 있는가를 고민함으로써, 현재의 질문을 좋은 질문으로 발전시켜 나갈 수 있기 때문이다. Big Question과의 양방향성 관계를 한 마디로 표현한 것이 바로 하이젠베르크의 말이라 할 수 있는데, 그는 Big Question을 선택하되 문제 자체는 작고 깊어야 한다고 강조했다.

좁은 전문 영역에서 연구 활동을 하면서 동시에 Big Question을 염두에 둘 수 있는 효과적인 방법으로는 란다우 학파의 진즈부르크가 제시한 것처럼 규칙적으로 Big Question 목록을 만들고 업데이트하는 것이다. 업데이트 작업을 통해 학계의 변화 및 학문의 변화에 대한 감을 놓치지 않는 것이 우물 안 개구리가 되지 않도록 도와줄 수 있을 것이다.

Tip 2. 연구 주제 탐색을 위한 '적절한' 수준의 리뷰가 필요하다.

우리가 살펴 본 사례 연구에서 빈번히 발견되는 노벨상 수상자들의 증언 중 하나는 그들이 연구 주제를 찾는 동안 선행 연구에 대해 충실한 리뷰를 했다는 점이다.

1997년 노벨 물리학상을 수상한 스티븐 추가 박사를 마치고 처음 벨 연구소에 갔을 때 그의 상사는 추에게 당장 연구에 뛰어들 생각 하지 말고 6개월 동안 도서관에서 연구 문제를 탐색하라고 충고했다. 추는 이 조언을 충실히 따라, 리뷰 논문을 작성하면서 새로운 분야를 개척하는 연구 주제를 찾는 데 시간을 보냈다.

1996년 노벨 화학상을 수상한 리처드 스몰리도 박사 후 연구원을 시작하면

서 운 좋게 적절한 리뷰 시간을 가질 수 있었다. 당시 박사후 과정 지도교수가 몇 개월 간 해외에 나가 있었던 덕에, 스물리는 박사 후 연구 과정에 곧장 뛰어들지 않고 몇 개월 간 도서관에 살면서 리뷰를 할 시간을 확보할 수 있었고, 여기에 박사 논문 심사 준비의 부담이 긍정적으로 더해져 그는 매우 참신한 연구 문제를 만들어 낼 수 있었던 것이다.

이처럼 연구 문제 탐색 시에 선행 연구에 대한 리뷰를 해야 한다는 점은 좋은 연구 문제를 형성하는 데 있어 빠질 수 없는 부분인데, 여기서 한 가지 주의할 점이 있다. 그것은 리뷰가 ‘적절한’ 수준에서 이루어져야 한다는 것이다. 이 점에 있어서는 2010년 노벨 물리학상 수상자인 앙드레 가임의 충고를 눈여겨볼 필요가 있다. 가임은 선행 연구에 대한 리뷰가 그 문제에 대해 잘 정리된 3~4편의 논문이면 충분하다고 지적했다. 논문을 많이 본다고 해서 더 좋은 문제를 선택하지는 못한다는 것이다. 선행 연구를 지나치게 많이 볼 경우, 벌써 그 문제에 대해서는 모든 연구가 다 되어 있는 것처럼 여겨져서 오히려 연구 문제 탐색을 방해할 수도 있기 때문이다. 따라서 좋은 연구 주제를 찾기 위해서는 그 분야에 대해 훌륭하게 정리된 리뷰 논문 3~4편 정도를 보는, ‘적절한’ 수준의 리뷰가 중요하다 할 수 있겠다.

Tip 3. 동료와의 협력을 위한 커뮤니케이션이 중요하다.

과학자에 대한 흔한 편견 중 하나는 과학자들은 고지식하고 내성적이며 골방에서 고독하게 연구를 수행하기 때문에 다른 사람과 소통하는 데 서툴다는 것이다. 그러나 오늘날 홀로 연구를 수행하는 과학자는 거의 없다. 오늘날 대부분의 과학자들은 연구실 내의 동료들 혹은 다른 연구소의 과학자들과 공동 연구를 수행한다. 저널에 실린 논문에는 여러 공저자의 이름이 함께 올라가 있는 것이 일반적이고, 공저자가 열 명이 넘는 경우도 드물지 않다. 따라서 오늘날 과학자에게 요구되는 덕목은 ‘고독한 천재’가 아니라 ‘동료들과 소통’이라고 할 수 있다. 다른 동료들과 효과적으로 소통할 수 있는 능력은 좋은 연구를 위해 요구되는 필수적인 덕목이기 때문이다. 노벨과학상 수상자들이 어떤 특징을 가졌는지를 분석한 주커만은 노벨상 수상자들과 보통 연구자들의 공저 논문의 비율을 연령대 별로 분석한 결과 노벨과학상 수상자들이 같은 나이 대

의 보통 연구자들에 비해 공저 논문 비율이 더 높다는 것을 지적하며 그들이 협동 연구에 더 능하다는 사실을 보여주었다.⁴⁵⁾

실제로 좋은 연구 주제를 발굴하는 과정에서도 동료들과의 소통은 매우 중요하다. 앞에서 본 추와 1974년 노벨 생리의학상을 수상한 조지 펄라디(George E. Palade)의 사례는 이를 잘 보여준다. 추는 벨 연구소의 동료 아트 애쉬킨(Art Ashkin)과의 사적인 대화 과정에서 빛으로 원자를 냉각시키는 연구의 아이디어를 얻었으며, 그 후 개발한 방법을 생물학적 문제 풀이에 확장, 적용시키는 데 있어서도 애쉬킨과의 대화가 중요하게 작용했다. 실로, 벨 연구소는 진작에 그 점을 인식하여, 연구소의 공간 구성 자체를 연구원들의 소통이 활발히 일어날 수 있도록 디자인 했다.

펠라디는 복잡한 아이디어들을 매우 간결하고 쉽게 표현하는 소통 능력으로 다른 사람들과의 협력 연구를 효과적으로 이끌어낼 수 있었다. 펄라디가 록펠러 연구실을 세포생리학 연구의 메카로 만들 수 있었던 데는 그의 이런 소통 능력이 매우 중요하게 작용했던 것이다. 1996년 노벨 생리의학상을 수상한 도허티도 이런 소통 능력의 중요성을 지적한 바 있는데, 자서전에서 그는 노벨상을 받는 법의 하나로 “명쾌하고 간결하게 쓰는 법을 익혀라”고 조언하고 있다.⁴⁶⁾

그 누구보다 동료와의 소통 능력의 중요성을 가장 잘 보여준 사람은 1922년 노벨 물리학상 수상자인 닐스 보어일 것이다. 앞서 살펴 본 하이젠베르크의 사례에서도 잘 드러나 있는 것처럼, 보어의 양자 연구에서 가장 중요했던 방법은 동료 연구자들, 특히 젊은 연구자들과의 대화였다. 그는 하이젠베르크, 란다우, 파울리, 가모브 등 아직 고전역학적인 세계관에 완전히 빠져들지 않은 젊은 물리학자들과의 격의 없는 대화를 통해 자신이 폭 빠져 있는 고전역학적 세계관이 안고 있는 내생적인 문제를 젊은 연구자들의 신선한 아이디어를 통해 찾아내려고 했다. 보어를 연구한 한 학자는 이를 두고 보어는 언제나 “공명판(sounding board)”을 필요로 했다고 평하기까지 했는데, 보어나 하이젠베르

45) Harriet Zuckerman, “Nobel Laureates in Science: Patterns of Productivity, Collaboration, and Authorship,” *American Sociological Review* 32 (1967), p. 395.

46) 피터 도허티, 『노벨상 가이드』

크는 문제가 무엇인지조차 분간해 내기 어려운 상황에 직면했을 때 동료와의 소통이 얼마나 중요한 지를 다시금 확인시켜 주는 경우라 할 수 있다.

Tip 4. (주 연구 문제 외에) 2차 탐구 주제를 개발하는 것이 필요하다.

보통 연구자들은 자신의 전문 분야, 다른 말로 하면 박사 과정에서 선택한 전문 영역에만 국한해서 연구를 한다. 하지만 박사 과정에서 선택한 주제가 시기적절하지 않은 것이었다면 어쩔 것인가? 앞서 살펴본 노벨과학상 수상자들의 자전적 기록을 살펴보면, 박사 과정에서 했던 연구에서 의미 있는 성과를 내지 못한 경우가 꽤 있다. 가임은 심지어 자신의 시대에 뒤떨어졌던 박사 연구를 “좀비 프로젝트”라고 부르기까지 하며, 자신의 학생들에게는 그런 좀비 프로젝트를 안기지 말아야겠다는 중요한 교훈을 박사 시절에 얻었다고 회고했다. 이외에도 좁은 전문 영역에만 국한되어 연구를 할 경우, 연구자의 시야가 지나치게 좁아질 수도 있고, 그 분야의 연구가 별다른 성과를 내지 못할 경우 수년에 걸친 노력에도 결국 아무 것도 남지 않는 결과에 직면할 수도 있다.

주 연구 주제 외에 2차 탐구 주제를 개발하는 것은 이런 위험성을 낮출 수 있다는 점에서 의미가 있다. 이와 관련해서는 앞서 살펴본 가임의 “금요일밤 실험(Friday Night Experiment)” 통한 “탐험적인 우회(exploratory detour)”는 매우 좋은 지침을 제공해 준다. 가임의 말처럼, 탐험적인 우회는 최소의 노력을 들여 평소에 궁금해 했던 문제를 탐험하는 시도로, 단순한 호기심을 유의미한 질문으로 격상시키는 작업이다.

가임의 사례를 보면, ‘탐험적인 우회’에서 중요한 것은 새로운 현상을 발견한 이후, 그 다음 단계의 작업들이다. 자칫 재미거리로 끝날 수 있는 실험을 의미 있는 것으로 만들기 위해 가임과 그의 연구팀은 이 실험이 어떤 Big Question 과 연결될 수 있는가에 대해 고민하고, 기존의 연구 및 이론에 대한 리뷰를 통해 이 현상을 좋은 연구 문제로 발전시켜 나갔다. 이런 과정을 거쳐, 그의 전공과 동떨어져 있던 2차 탐구 주제는 그의 새로운 전공 영역이자 주 연구 영역이 되었다.

가임의 사례에서 볼 수 있듯이, 전문 영역이나 주연구 영역에서 동떨어진 2차 탐구 주제의 탐색은 연구자가 새로운 연구 주제를 찾아내는 데 매우 효과

적으로 이용될 수 있다. 가임처럼 매주 금요일 밤, 평소에 품고 있던 막연한 궁금증에 대해, 주변에 이용 가능한 실험 도구들만을 이용해서 간단한 실험을 수행한다면 시간, 비용, 노력 대비 효율성 높은 연구 성과를 얻어낼 수 있을 것이다.

Tip 5. 최신 혹은 타분야의 분석 방법(기구)에 관심을 가지는 것이 중요하다.

융합 연구는 오늘날 과학계의 트렌드라 할 수 있다. 분야간 경계가 점차 흐려지면서 서로 다른 분야에 속한 연구자들이 연합하여 공동으로 연구를 수행하는 것은 과학계에서 매우 일상적인 풍경이 되어가고 있다. 하지만 모든 융합 연구가 효율적으로 이뤄지는 것은 아니다. 융합 연구에 참여하는 연구자들이 서로 다른 지적 배경을 가지고 있기 때문에 소통의 어려움이 발생하기도 하고, 접근 방법의 차이로 인해 연구가 체계적으로 이뤄지지 못하는 경우도 많기 때문이다.

그러나 융합 연구가 반드시 서로 다른 분야의 연구자들 간의 공동연구로만 이뤄져야 하는 것은 아니다. 3장에서 살펴본 노벨상 수상자들의 사례에서도 드러나듯이 우수한 연구는 다른 분야의 분석 방법이나 기구를 도입함으로써 이뤄지는 경우가 많기 때문이다. 근대과학혁명을 이끈 갈릴레오는 망원경의 발명 소식을 듣고 그것의 원리를 적용하여 직접 망원경을 만들어 해와 달 등 천체를 관찰하여 천문학과 역학의 획기적 발전을 이루어 냈다. 최근 이런 경향이 가장 강하게 드러나는 분야는 생리학 분야이다. 1950년대 이후 생리학 분야는 물리학이나 화학에서 개발된 분석 방법(기구)의 영향을 많이 받았다. 예컨대, 초파리 유전학자 허만 멀러(Hermann Joseph Muller)는 초파리 연구에 X선 분석법을 도입함으로써 1946년에 노벨 생리학상을 받았으며, 펠라디는 전자현미경을 세포연구에 도입함으로써 세포생리학 분야를 개척한 공로로 1974년 노벨 생리학상을 받았다. 또한 도네가와 스스무도 분자생물학의 최신 연구 방법들을 섭렵하고 이를 면역학 연구에 도입함으로써 항체 형성의 유전학적 원리를 규명할 수 있었고 이로 인해 1987년 노벨 생리학상을 받았다.

이처럼 다른 분야 혹은 최신의 분석 방법(기구)를 섭렵하여 이를 자신의 연

구 주제에 적용해보는 것은 문제해결에 도움이 될 뿐만 아니라 새로운 영역을 개척하는 데도 도움이 될 수 있다.

이와 같이 5개의 주요 Tip이외에도 사례에서 노벨상 수상자들의 연구 활동 경력에 역할을 한 요소들을 더 언급하면 다음과 같은 것들이 있다.

- 다양한 경험을 하고 그것들을 활용하는 방안을 생각하라
- 연구 환경에 맞는 연구 주제를 선택해도 된다
- 자연을 심문(審問)하라.
- 과학이외에도 관심을 가져라
- 자유스럽게 쉬는 시간도 필요하다
- 최초가 중요하다
- 운도 필요하다

4장. 연구 활용 방안

1. 정책적 활용 방안

본 연구에서는 노벨과학상을 중심으로 기초 과학 분야의 미래 유망 주제들을 중단기 유망 주제와 장기 유망 주제로 나누어 조사했다.

10년 이내에 과학계의 각광을 받을 만한 중단기 유망 주제는 노벨과학상의 가능한 후보들에 대한 조사를 통해 예측했다. 노벨과학상의 최근 추세를 보면 수상을 하게 된 연구를 한 시기와 실제 수상을 하게 된 시기 사이에 대략 15년 이상의 시간차를 보이고 있다. 따라서 10년 이내에 노벨과학상을 수상할 가능성이 높은 연구를 예측할 수도 있다. 그것은 이미 연구결과가 발표되었고 벌써부터 각광을 받고 있거나 앞으로 10년 이내 각광을 받게 되는 것 중에서 짐작할 수 있을 것이다.

노벨과학상 수상 후보 예측에는 소위 노벨상의 ‘징후적 지시자’라고 하는 지표가 사용되었다. 노벨상의 ‘징후적 지시자’는 노벨상 수상과 상관성이 높은 일종의 지표들을 지칭하는 것인데, 본 연구에서는 그 상을 탄 이후 노벨상을 타는 빈도가 높은 울프상과 래스커상, 논문 인용 지수에 기초하여 발표되는 톰슨 로이터의 인용상, 노벨위원회의 주관으로 개최되는 노벨 심포지엄을 그 징후적 지시자로 사용했다. 이렇게 해서 나온 결과는 물리, 화학, 생리학 세 분야에서 각각을 다시 4-6개의 하위 분야로 나누어 정리했다(세부 결과는 2장을 참고할 것). 이렇게 선정된 주제와 그 주제에서 이미 저명한 학자들이 단·중기적으로 노벨상 수상 가능성의 풀이라고 할 수 있다. 애석하게도 우리나라

라 학자(외국 거주학자 포함하여)는 이 풀 안에 없기 때문에 앞으로 10년정도 내에 노벨 과학상 수상 가능성은 희박하다고 예상할 수 있다.

10년 이상의 미래에 유망할 것으로 예상되는 장기 유망 주제는 과학계의 석학들의 견해나 *Science*, *Scientific American*, *Nature* 등의 권위 있는 저널의 기사, 정부 보고서 등을 기초 자료로 조사했다(세부적인 내용은 2장 참고). 이를 종합하여 물리, 화학, 생리학 분야의 미래 유망 주제를 큰 카테고리별로 정리한 결과는 다음과 같았다.

물리	입자의 구조, 더 나아가 근본적인 대통일장 이론의 유효성 여부 우주의 근원과 구조 새로운 응집물질의 개발과 그 이론 양자역학의 더욱 근본적인 이해와 그 응용 생명체를 포함한 복잡계의 물리학적 이해
화학	분자 수준에서 다양한 화학 반응의 이해 원하는 성능과 구조의 화합물의 효율적 합성 방법 에너지의 효율적 생산과 저장, 활용을 위한 화학 환경 친화적인 화학 반응 고안 복잡한 생체 화학 반응의 근본적 이해를 통하여 의약품 개발
생리학	인간의 면역체계의 근본적인 이해와 이를 응용한 새로운 질병 대응 연구 유전자로부터 각종 생리 현상의 분자 수준 이해 세포 내의 복잡한 반응 네트워크의 근본적인 이해 인간의 주요 질병의 근본적 원인과 치료법 노화의 원인 규명과 장기를 대체하는 연구 인식의 과학적 규명 등 뇌 연구 생리학 연구에 중요한 진전을 보일 수 있는 연구 방법 또는 장비 개발

중단기 및 장기 유망 주제 선정 과정과 결과로부터 다음과 같은 함의를 도출할 수 있다.

첫째, 중단기 유망 주제로 선정된 연구들은 현재 한창 진행 중이거나 이미

어느 정도 성과를 낳은 과제들로, 그 중요성을 이미 과학계에서 인지한 연구들이라 할 수 있다. 이는 이 주제가 이미 저명 학자들에 의해 선점되어 있을 가능성이 높다는 것을 의미한다. 이와 같은 주제의 경우 응용과 활용 목적이 아닌, 기초적이고 사소한 세부 주제를 연구하는 것은 큰 의미가 없으므로, 정부의 연구 지원 시스템에서 이 점을 고려할 필요가 있다.

둘째, 중단기 유망 주제 조사에 따르면 5-10년 이내에 노벨과학상 후보로 점쳐지는 학자 중에는 한국 학자가 거의 포함되어 있지 않다. 따라서 정부의 노벨과학상 수상을 위한 지원은 최소 15-20년, 현실적으로는 그보다 더 먼 미래를 겨냥해야 할 것이다.

셋째, 10년 이상의 미래를 내다보는 장기 유망 주제들은 큰 틀에서 중요한 주제들을 제시해 주고 있기는 하나 세부적인 주제들, 즉 그 주제들에 대한 해결책을 제시하기 위해 풀어야 할 구체적인 문제들과 접근법은 아직 미정인 상태라고 할 수 있다. 따라서 이런 주제들에 대해 창의적이고 도전적인 연구를 할 수 있도록 장려하는 연구 환경이 조성되고 연구지원시스템에 확립되어야 할 것이다. 특히 이런 주제들은 실패를 통해 경험을 축적하여 큰 성과를 얻는 경우가 많으므로, 실패 위험성이 높지만 그 보상 또한 큰(high risk, high return) 연구를 장려하고 단기적인 실패를 용인해 주는 연구 지원 시스템이 마련되어야 할 것이다.

넷째, 노벨과학상 수상자들의 문제 형성 과정을 살펴보면 그들도 다양한 주제를 시도하는 과정을 통해 우수 연구 주제를 발굴한 것을 알 수 있다. 또한 유망 주제를 발굴했다고 할지라도 그 중요성이 인정받기까지는 상당한 시간이 필요하므로, 이런 다양한 시도들을 누적적으로 활용할 수 있도록 도와주는 기초 과학 분야에 대한 장기적인 지원 시스템이 확립되어야 할 것이다.

이와 같은 함의 아래 앞으로 과학기술정책을 수립하고 세부 사업을 수립하며 운영방안을 마련할 때 고려해야 할 구체적인 방안을 제안하면 다음과 같다.

- 그 동안 우리나라의 과학기술지원 방향은 기초연구지원 사업조차도 ‘선택과 집중’이라는 전략아래 이미 연구 실적이 누적된 학자들을 선정하여 집중

지원하는 방향을 선호해 왔다. 본 연구 결과에 의하면 현재 집중지원을 받고 있거나 앞으로 집중지원을 받을 만한 중견 우수 학자 중에서 처음으로 시도하여 그 분야를 개척한 학자는 거의 없기 때문에 노벨상에 근접한 우리나라 학자는 없다는 것이다. 따라서 우수한 학자가 나올 수 있는 분위기를 만들려면 지금이라도 초심으로 돌아가 소형과제를 다수에게 지원하는 방향으로 전환하여야 한다. 이미 개척된 분야에서 쫓아하여 당장 우수 학술잡지에 나올 수 있는 논문을 생산하는 연구보다 연구논문이 당장 우수 잡지에는 실리지는 않고 인용횟수의 업적이 부족하더라도 새로운 학문을 하는, 즉 Cha-cha-cha이론에서 임무형이나 도전형의 창조적 문제 해결에 도전하는 분위기를 만들어야 할 것이다. 그리고 창조적인 문제에 의하여 새로운 분야를 개척하고 있다는 학계의 평가가 있으면 집중지원을 하는 사업과 연계하여 세계적인 학자를 육성하여야 한다.

- 단순히 논문수나 논문인용횟수등의 지표상 우위에 있는 학자가 인정받는 것이 아니라 창조적인 주제를 연구하여 새로운 학문분야를 여는 것을 인정받는 학계의 분위기를 만들려면 연구 심사과정에도 변화가 있어야 한다. 현재 대부분의 연구과제 심사과정에서 연구 업적과 연구 계획을 동시에 심사하고 있다. 그러나 이러한 절충적인 방법외에 완전히 업적만을 가지고 선정하여 지원하는 심사과정을 갖는 사업과 업적은 완전히 배제하고 연구 계획만을 가지고 심사하는 사업도 일부 만들어야 한다. 즉 업적만 보고 선정하는 사업도 있고, 업적은 전혀 보지 않고 연구계획 만을 보고 선정하는 사업도 있어야 할 것이다. 이러한 것들이 진정한 모험적 연구사업이 될 것이다.

- 집중 지원을 하는 대형사업을 시행할 때에 심사방법의 전략에 변화가 있어야 할 것 같다. 선정심사에서는 후보자의 연구 실적의 많고 좋음, 인용수의 많고 적음의 문제가 아니라 새로운 분야를 개척하였는가에 더 초점을 맞추어야 할 것 같다. 왜냐하면 새로운 분야를 개척하면 그것에 관심을 갖는 학자들이 아직 적어 연구결과 인용횟수등의 실적이 많지 않을 것이다. 따라서 SCI 논문의 수나 인용수를 적용하는 방법은 그리 옳지 못할 것 같다. 그러나 사업에 선정된 후 진행되는 과정의 중간 평가나 결과 평가에서는 연구업적의 양과 질이 주요 평가 대상이 되는 것은 합리적인 것이다.

- 그리고 진정한 연구하는 분위기를 만드는데 학계와 정부는 노력해야 한다. 우선 학자들에게 가능한 한 연구에 전념할 수 있는, 즉 잡일을 없애도록 모든 제도를 만들어야 한다. 본 연구에서도 케이스 연구결과를 보면 노벨상 수상자들은 하나같이 연구에 전념할 수 있는 환경을 가졌을 때 좋은 주제를 선정할 수 있었고 훌륭한 연구결과를 발표 하였다. 좋은 연구환경이란 연구를 좋아하는 학자들과 어울려서 자유스럽게 토론하고 생각을 공유할 수 있는 분위기이다. 이러한 분위기를 활성화하기 위한 자발적으로 연구 소모임을 형성할 수 있도록 유도하는 정책이 필요하다. 구체적인 예로는 새로운 연구장비의 제작이나 설치를 중심으로 한 소모임의 유도도 한 방법일 것이다.

- 신진 인력의 발굴 육성이 매우 중요하다. 현재 신진인력지원사업 정도로는 세계적인 학자를 육성하기에 부족한 면이 있다. 신진 인력이 연구를 시작할 때는 연구환경을 만드는데 많은 재원이 필요하다. 선진외국의 경우, 미국에서는 좋은 대학일수록 seed money를 지원하고 있고 그 외 일본 유럽에서는 이미 잘 갖추어진 연구실에 신진 인력이 들어가 바로 연구를 할 수 있는 환경이 만들어져 있다. 그러나 우리나라의 경우 연구환경이 만들어지지 않아 가장 왕성하게 연구할 시기를 교육만을 하면서 보내거나 어렵게 신진연구지원사업에 선정된다하더라도 연구환경의 부족으로 새로운 분야의 개척은 꿈도 못꾸는게 현실이다. 이를 타개할 수 있는 근본적인 정책이 필요하다.

- 그동안 홍보가 중요하다고 하여 우수 학술잡지에 발표를 하면 언론에 보도되게 하는 홍보 전략을 정부가 주도하였다. 이는 학자들에게 일종에 잡일을 만들게 할 뿐아니라 언론에 나서는 학자가 좋은 학자인 듯한 왜곡된 이미지를 학계나 일반인에게 심어주는 문제가 있을 수 있다. 이러한 홍보는 과학기술계에 대한 일반인들의 인식에서 늑대와 양치기소년의 우화같은 이미지를 심어줄 우려가 있다는 것을 정부와 언론계는 인지해야 할 것이다. 즉 과학기술은 단기간내에 무엇인가를 이룰 수 있는 것이 아니라 정말 좋은 연구결과와 우수한 학자의 육성은 수 십년에 걸쳐서 이루어진다는 것을 알려야 할 것이다.

2. 교육적 활용 방안

본 연구에서는 노벨과학상 수상자들의 연구 문제 형성 과정에 대한 사례 분석을 통해 좋은 연구 문제를 형성하는 데 도움이 되는 중요한 팁들을 제시했다. 그것을 정리하면 다음과 같다.

- Big Question을 항상 염두에 둘 것
- ‘적절한 수준’의 선행 연구 리뷰
- 동료와의 협력을 위한 활발한 커뮤니케이션
- (본 주제 이외의) 이차 주제 탐색
- 융합 연구를 위한 최신 혹은 타분야의 분석 기구에 대한 관심

본 연구는 본 연구에서 찾아낸 연구주제 형성의 중요 조건들과 본 연구에서 수행한 분석 방법, 두 가지 측면에서 현장 연구자들의 교육에 활용될 수 있을 것이다.

첫째, 위에서 제시한 연구 문제 형성에 관한 실천적인 팁들은 연구자들을 대상으로 하는 연구방법론 교육에서 활용될 수 있을 것이다. 특히, Big Question과 관련해서는 연구자들이 2-3년에 한 번씩 스스로의 Big Question 목록을 업데이트 하도록 하는 방식을 채택하게 함으로써, 이에 대한 관심을 계속해서 유지시켜 갈 수 있을 것이다.

둘째, 본 연구에서 수행한 분석 방법, 즉 최근 노벨상 연구 주제의 분석과 노벨상 수상자들의 주제 형성 과정에 대한 사례 연구는 연구자 개개인이 자신의 분야에 대해 수행해 볼 수 있다. 이처럼 연구자 개개인이 자신의 세부 전공 분야로 국한시켜 수행할 경우, 연구자는 우수 주제 형성에 대해 자신의 전공 분야의 특성을 찾아내어 자신의 연구 주제 형성 과정에 활용하거나 혹은 자신의 연구 방법을 반성적으로 되짚어 볼 수 있을 것이다. 이런 점을 고려하여, 과학 방법론적 혹은 발견법적인 분석을 학부 고학년 때나 대학원 시작의 수업 과정으로 포함시킬 경우, 연구자로 나서는 첫 시기부터 우수 연구 주제 형성을 위한 효과적인 방법들을 습득할 수 있을 것이다.

참고문헌

- Benjamin F. Jones and Bruce A. Weinberg, "Age dynamics in scientific creativity," *PNAS* 108:47 (2011), pp. 18910-18914.
[www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1102895108]
- Bruce A. Weinberg, "Geography and Innovation: Evidence from Nobel Laureate Physicists," Unpublished Paper? (2007)
- Colin Berry, "The Nobel Scientists and the Origins of Scientific Achievement," *The British Journal of Sociology* 32:3 (1981), pp. 381-391.
- Daniel E. Koshland Jr., "The Cha-Cha-Cha Theory of Scientific Discovery," *Science* 317 (2007) pp. 761-762.
- Emilio Segre, *From X-rays to Quarks: Modern Physicists and Their Discoveries* (W.H. Freeman and Company, 1980)
- Eugene Garfield and Morton V. Malin, "Can Nobel Prize Winners Be Predicted?" Paper Presented at 135th Annual Meeting, American Association for the Advancement of Science (1968)
- Gerald Holton, *Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein* (Harvard University Press, 1988)
- Gunnar Törnqvist, "Creativity in Time and Space," *Geogr. Ann.* 86B:4 (2004), pp. 227-243.
- Harriet Zuckerman, "Nobel Laureates in Science: Patterns of Productivity, Collaboration, and Authorship," *American Sociological Review* 32:3 (1967), pp. 391-403.
- Harriet Zuckerman, *Scientific elite: Nobel laureates in the United States* (New York: Free Press, 1977)

- Istvan Hargittai, *The Road to Stockholm: Nobel Prizes, Science, and Scientists* (Oxford: Oxford University Press, 2002)
- J. C. Biro, "Seven Fundamental, Unsolved Questions in Molecular Biology," *Medical Hypotheses* 63 (2004), p. 951-962.
- Larisa Shavinina, "Explaining High Abilities of Nobel Laureates," *High Ability Studies* 15:2 (2004), pp. 243-254.
- Paul Wender etc., "What Lies Ahea," *Nature* 461 (2011), pp. 23-25.
- Paula E. Stephan and Sharon G. Levin, "Age and the Nobel Prize Revisited," *Scientometrics* 28:3 (1993), pp. 387-399.
- Philip Ball, "10 Unsolved Mysteries in Chemistry," *Scientific American* 305:4 (2011), pp. 48-53.
- Rebecca Reiff and Williams Harwood and Teddie Phillipson, "A Scientific Method Based upon Research Scientists' Conception of Scientific Inquiry," in *Proceedings of the Annual International Conference of the Association for the Education of the Teachers in Science* (2002), p. 2-25.
- Robert Marc Friedman, *The Politics of Excellence: Behind the Nobel Prize in Science* (New York: Times Books, 2001)
- Robert Root-Bernstein, "Problem Generation and Innovation," in Larisa V. Shavinina (ed.) *International Handbook on Innovation* (Elsevier Science Ltd., 2003), pp. 170-179.
- Romualdas Karazija and Alina Momkauskait, "The Nobel prize in physics: Regularities and Tendencies," *Scientometrics* 61:2 (2004), pp. 191-205.
- Robin McKie, "Japan's Nobel ploy riles Swedes" *Guardian* (2011. 12. 16)
[<http://www.guardian.co.uk/world/2001/dec/16/japan.internationaleducationnews>]
- Ryoji Noyori etc., "The Future of Chemistry," *Nature Chemistry* 1 (2009. 4), pp. 5-15.
- Yves Gingras and Matthew L. Wallace, "Why It Has Become More Difficult to Predict Nobel Prize Winners: a Bibliometric Analysis of Nominees and Winners of the Chemistry and Physics Prizes (1901 - 2007)," *Scientometrics* 82

(2010), pp. 401 - 412.

Vitaly L. Ginzburg, "On Superconductivity and Superfluidity," *Nobel Lecture* (2003), pp. 96-127.

KISTEP 정책기획실·기술예측단, "미 MIT 선정, 2011년 10대 유망기술" (2011. 5. 23)

교육과학기술부, 『기초연구 100대 미래유망분야 선정결과 및 활용방안(안)』
(2011)

노벨재단 엮음, 이광렬, 이승철 역, 『당신에게 노벨상을 수여합니다: 노벨
물리학상』 (바다출판사, 2010)

노벨재단 엮음, 우경자, 이연희 역, 『당신에게 노벨상을 수여합니다: 노벨
화학상』 (바다출판사, 2010)

노벨재단 엮음, 권오승·유영숙·한선규 역, 『당신에게 노벨상을 수여합니다:
노벨 생리의학상』 (바다출판사, 2010)

바바 렌세이 정성호 역 『노벨상 100년: 물리학상, 화학상, 생리·의학상으로
엮은 과학사』 (문학사상사, 2003)

박병원 등, 『제3회 과학기술예측조사 수정·보완(2008-20)』 (KISTEP, 2008)

버튼 펠트먼, 전제아 역, 『노벨상의 교양을 읽는다』 (한국경제신문, 2008)

백동열 등, 『기초과학연구 100대 미래유망 분야 선정을 위한 기획 연구』
(더비앤아이, 2011)

베르너 하이젠베르크, 김용준 역, 『부분과 전체-개정신판』 (지식산업사, 2005)

손석호·한종민·임현, 『2011년 KISTEP 선정 10대 미래 유망기술(ISSUE PAPER
2011-02)』 (KISTEP, 2011)

생명공학 정책 연구센터, 『BT 기술동향 보고서: 바이오 연구 트렌드 분석 및
미래유망 연구 테마 도출(총서 149권)』 (2011) [<http://www.bioin.or.kr/>]

아그네타 발린 레비노비츠, 이충호·김훈·안국신 역, 『노벨상, 그 100년의 역사』 (가람기획, 2002)

임경순 등, 『노벨과학상 분석 및 접근전략 연구(위탁사업: 2008-36)』 (교육과학기술부, 2008)

차두원, “세계 29번째 노벨과학상 수상국을 위한 도전 기초과학과 창조형 R&D가 비결”, 『Science & Technology: Focus』 Vol. 77 (2011. 1), 8-11쪽.

차두원·이종률·장인호, 『노벨과학상 수상 현황 분석과 우리의 대응 방안(ISSUE PAPER 2010-15)』 (KISTEP, 2010)

피터 도허티, 류운 역, 『노벨생리의학상 수상자 피터 도허티 교수의 노벨상 가이드』 (알마, 2008)

웹사이트

<http://www.nobelprize.org> (노벨상 홈페이지)

<http://ip-science.thomsonreuters.com/nobel/> (투스-로이터 인용상)

<http://www.wolffund.org.il/main.asp> (울프재단 홈페이지)

<http://www.laskerfoundation.org/awards/index.htm> (래스커재단 홈페이지)

<http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=a05302> (2004년 노벨 물리학상 수상자 데 이비드 그로스의 2005년 CERN 강연 자료 “Future of Physics”)

부록

부록1. 노벨과학상 수상 목록 (1901-2011)

가. 노벨 물리학상

연도	수상자	수상 연구
1901	Wilhelm Conrad Röntgen	X선 발견
1902	Hendrik Antoon Lorentz Pieter Zeeman	radiation 현상에 미치는 자기의 영향 (스펙트럼 연구)
1903	Antoine Henri Becquerel Pierre Curie, Marie Curie née Sklodowska	spontaneous 방사능 발견 베크렐이 발견한 방사능 현상 연구
1904	Lord Rayleigh (John William Strutt)	중요 기체들의 밀도 연구 및 아르곤 발견
1905	Philipp von Lenard	음극선 연구
1906	Joseph John Thomson	기체의 전도에 관한 이론적, 실험적 연구
1907	Albert Abraham Michelson	광학 정밀 측정 기계와 이를 이용한 분광학적, 계측학적 연구
1908	Gabriel Lippmann	간섭 현상에 근거해 사진으로 색채를 재생산해 내는 방법 연구
1909	Guglielmo Marconi Karl Ferdinand Braun	무선 전신 개발에 대한 공헌
1910	Johannes Diderik van der Waals	기체와 액체의 상태 공식에 대한 연구
1911	Wilhelm Wien	열복사 법칙에 관한 발견
1912	Nils Gustaf Dalén	등대와 부표의 가스 accumulator와 함께 쓸 수 있는 자동 밸브 발명
1913	Heike Kamerlingh Onnes	저온에서 물질의 특성 연구 및 액체 헬륨 생산
1914	Max von Laue	X선분광학에 중요한, 결정에 의한 X선 회절 연구
1915	Sir William Henry Bragg William Lawrence Bragg	X선을 이용한 결정 구조 분석, X선 결정학의 중요한 진보
1916	-	-

1919	Johannes Stark	캐널선(양전자)에서의 도플러 효과 발견과 전기장에서 분광학선의 splitting
1920	Charles Edouard Guillaume	니켈-강철 합금에서의 이상 현상 발견을 통해 정밀 측정에 기여
1921	Albert Einstein	광전효과 법칙의 발견과 이론물리학에 대한 기여
1922	Niels Bohr	원자 구조와 원자의 복사에 대한 연구
1923	Robert Andrews Millikan	기본 전하와 광전 효과에 관한 연구
1924	Manne Siegbahn	X선 분광학 분야의 발견과 연구
1925	James Franck Gustav Ludwig Hertz	원자에 대한 전자의 impact에 관한 법칙 발견 (프랑크-헤르츠 법칙)
1926	Jean Baptiste Perrin	물질의 불연속적 구조에 관한 연구 (분자운동에 관한 연구)
1927	Arthur Holly Compton Charles Thomson Rees Wilson	컴프턴 효과 발견 구름상자를 이용해 하전된 입자의 경로 탐색 방법 개발
1928	Owen Willans Richardson	열이온 현상, 특히 리차드슨 법칙 발견
1929	Louis-Victor Broglie	전자의 파동적 특성 발견
1930	Chandrasekhara Venkata Raman	라만 효과 발견과 빛의 산란에 관한 연구
1931	-	-
1932	Werner Karl Heisenberg	양자역학 창시, 수소의 동소체 발견
1933	Erwin Schrödinger Paul Dirac	새로운 형태의 생산적인 원자 이론 발견
1934	-	-
1935	James Chadwick	중성자 발견
1936	Victor Franz Hess Carl David Anderson	우주선 발견 양전자 발견
1937	Clinton Joseph Davisson George Paget Thomson	결정에 의한 전자 회절의 실험적 발견
1938	Enrico Fermi	중성자조사를 이용하여 새로운 방사성 원소 존재 입증 느린 중성자에 의해 야기되는 핵반응 발견
1939	Ernest Orlando Lawrence	사이클로트론 발명, 인공 방사성 원소에 대한 연구
1940	-	-
1941	-	-

1944	Isidor Isaac Rabi	원자핵의 자기적 특성을 기록하는 공명 방법 연구
1945	Wolfgang Pauli	배타 원리 발견 (1924년 발견)
1946	Percy Williams Bridgman	극고압을 만들어내는 도구 발명과 고압 물리 연구
1947	Edward Victor Appleton	대기 상층부 물리학, 특히 애플턴층 발견
1948	Patrick Maynard Stuart Blackett	일순 구름상자 방법을 발견, 핵물리학과 우주선(cosmic radiation) 분야의 발견
1949	Hideki Yukawa	핵력 연구에 기반하여 메존 존재 예측
1950	Cecil Frank Powell	nuclear process를 연구하는 사진술 개발과 이 방법을 이용한 메존에 관한 발견
1951	John Douglas Cockcroft Ernest Thomas Sinton Walton	인공 가속된 원자 입자로 원자핵의 변환 연구
1952	Felix Bloch Edward Mills Purcell	핵자기 정밀 측정법의 개발 및 이와 관련된 발견들
1953	Frits (Frederik) Zernike	phase contrast microscope 발명과 phase contrast method의 증명
1954	Max Born Walther Bothe	양자역학의 근본 연구, 특히 파동함수의 통계적 해석 coincidence method와 그것을 이용한 발견
1955	Willis Eugene Lamb Polykarp Kusch	수소 스펙트럼의 미세 구조 연구 전자의 자기 모멘트에 대한 정밀한 결정
1956	William Bradford Shockley John Bardeen Walter Houser Brattain	반도체 연구와 트랜지스터 효과 발견
1957	Chen Ning Yang Tsung-Dao (T.D.) Lee	기본 입자에 관한 중요한 연구를 이끌어 낸 parity 법칙에 관한 연구
1958	Pavel Alekseyevich Cherenkov Il'ja Mikhailovich Frank Igor Yevgenyevich Tamm	체렌코프 효과의 발견과 해석
1959	Emilio Gino Segrè Owen Chamberlain	반양성자 발견
1960	Donald Arthur Glaser	버블 챔버 발명
1961	Robert Hofstadter Rudolf Ludwig Mössbauer	원자핵의 전자 산란에 관한 연구와 핵자 구조에 관한 발견 감마선의 공명 흡수에 관한 연구와 뫼스바우어 효과에 관한 발견
1962	Lev Davidovich Landau	응집 물질, 특히 액체 헬륨에 관한 이론

1964	Charles Hard Townes Nicolay Gennadiyevich Basov Aleksandr Mikhailovich Prokhorov	양자전자공학에서의 근본적인 연구들, 여기서 나온 메이저-레이저 원리를 기반으로 오실레이터와 증폭기 개발
1965	Sin-Itiro Tomonaga Julian Schwinger Richard P. Feynman	양자전기동역학에서의 근본 연구와 거기서 나온 기본 입자 물리학에 대한 결과
1966	Alfred Kastler	원자에서 헤르츠 공명을 연구하는 광학적 방법 발견 및 개발
1967	Hans Albrecht Bethe	핵반응 이론, 별에서의 에너지 생산에 관한 발견
1968	Luis Walter Alvarez	기본 입자 물리학에 대한 기여, 수소 버블 챔버와 데이터 분석 기술을 개발하고, 이를 활용하여 다수의 공명 상태 발견
1969	Murray Gell-Mann	기본 입자 분류와 그 상호작용에 관한 발견 및 연구
1970	Hannes Olof Gösta Alfvén Louis Eugène Félix Néel	전자유체역학의 발견과 근본적인 연구 및 플라즈마 물리학의 여러 분야에 대한 생산적인 응용 고체 물리에서의 중요한 응용을 이끈 반강자성체 및 페리자성에 관한 근본 연구 및 발견
1971	Dennis Gabor	홀로그래픽 방법에 관한 발명과 발견
1972	John Bardeen Leon Neil Cooper John Robert Schrieffer	초전도 이론(BCS-theory) 공동 개발
1973	Leo Esaki Ivar Giaever Brian David Josephson ^슨	각각 반도체와 초전도체에서의 터널링 현상에 관한 실험적 발견 터널 경계를 통한 초전류의 특성에 관한 이론적 예측, 특히 조셉슨 효과에 관한 현상
1974	Sir Martin Ryle Antony Hewish	라디오 천체 물리에 관한 연구 라일은 aperture synthesis technique 발명 및 관찰 휴위시는 펄서 발견
1975	Aage Niels Bohr Ben Roy Mottelson Leo James Rainwater	원자핵에서의 collective motion과 particle motion의 connection에 대한 발견, 이를 기반으로 원자핵 구조에 관한 이론 발견
1976	Burton Richter Samuel Chao Chung Ting	새로운 종류의 무거운 기본 입자 발견

1978	Pyotr Leonidovich Kapitsa Arno Allan Penzias Robert Woodrow Wilson	저온 물리학의 근본 발명 및 연구 우주 마이크로웨이브 배경 복사 연구
1979	Sheldon Lee Glashow Abdus Salam Steven Weinberg	기본입자들 사이의 약한 작용, 전자기 작용에 관한 통일 이론, 약한 중성자 예측
1980	James Watson Cronin Val Logsdon Fitch	중성 K-meson 붕괴 시 근본 대칭원리의 violation 발견
1981	Nicolaas Bloembergen Arthur Leonard Schawlow Kai M. Siegbahn	레이저 분광학 발전
1982	Kenneth G. Wilson	상전이와 관련된 임계 현상 이론
1983	Subramanyan Chandrasekhar William Alfred Fowler	별의 진화, 구조의 물리적 과정 이론적 연구 우주의 화학 원소 형성에 관한 핵반응의 이론적, 실험적 연구
1984	Carlo Rubbia Simon van der Meer	약력을 전달하는 field particle W와 Z의 발견을 낳은 large project에 기여
1985	Klaus von Klitzing	양자화된 홀 효과 발견
1986	Ernst Ruska Gerd Binnig Heinrich Rohrer	전자 광학의 근본 연구와 전자현미경 설계 연구 스캐닝 터널링 현미경 설계
1987	J. Georg Bednorz K. Alexander Müller	세라믹 물질에서의 초전도성 발견 (상온초전도체)
1988	Leon M. Lederman Melvin Schwartz Jack Steinberger	뮤온 뉴트리노 발견을 통한 렙톤의 더블릿 구조 증명과 중성자 빔 방법 개발
1989	Norman F. Ramsey Hans G. Dehmelt Wolfgang Paul	separated oscillatory fields method, 이를 이용한 수소 메이저 시계와 원자 시계 연구 ion trap technique 발전시킴
1990	Jerome I. Friedman Henry W. Kendall Richard E. Taylor	양성자와 bound neutron으로 전자의 비탄성 산란, 입자 물리에서 쿼크 모델의 발전에 핵심이 됨

1993	Russell A. Hulse Joseph H. Taylor Jr.	새로운 타입의 펄서 발견으로 중력 연구의 새로운 가능성을 엮 (중력파의 간접 증거)
1994	Bertram N. Brockhouse Clifford G. Shull	중성자 산란 테크닉 연구 (중성자 분광학) 중성자 산란 기술의 개발 및 중성자 회절 테크닉 개발
1995	Martin L. Perl Frederick Reines	타우 렙톤의 발견과 렙톤 물리학에 대한 실험적 기여 중성자 검출과 렙톤 물리학에 대한 실험적 기여
1996	David M. Lee Douglas D. Osheroff Robert C. Richardson	헬륨-3의 초유체 발견
1997	Steven Chu Claude Cohen-Tannoudji William D. Phillips	레이저로 원자를 냉각, trap하는 방법 개발
1998	Robert B. Laughlin Horst L. Störmer Daniel C. Tsui	부분적으로 전기를 띤 들뜬 상태의 새로운 형태의 양자 유체 발견
1999	Gerardus 't Hooft Martinus J.G. Veltman	약한 상호작용의 양자구조 발견
2000	Zhores I. Alferov Herbert Kroemer Jack S. Kilby	고속의 전자공학 및 광전자 공학에 사용되는 반도체 이질 구조 개발 집적회로 발명 공로
2001	Eric A. Cornell Wolfgang Ketterle Carl E. Wieman	알칼리 원자의 희석 가수에서의 보제-아인슈타인 응축 연구, 응축물(consensates)에 대한 초기의 근본 연구
2002	Raymond Davis Jr. Masatoshi Koshihira Riccardo Giacconi	천체물리, 특히 코스믹 뉴트리노 검출 연구 우주 엑스선원 발견, 엑스선 망원경 제작
2003	Alexei A. Abrikosov Vitaly L. Ginzburg Anthony J. Leggett	초전도체와 초유체 이론에 관한 선구적인 연구
2004	David J. Gross H. David Politzer Frank Wilczek	강한 상호작용에서 접근 자유성에 관한 발견
2005	Roy J. Glauber John L. Hall Theodor W. Hänsch	optical coherence에 관한 양자이론 optical frequency comb technique 등 레이저 정밀 분광학 발전시킴

2007	Albert Fert Peter Grünberg	거대한 자기저항 발견
2008	Makoto Kobayashi Toshihide Maskawa Yoichiro Nambu	broken symmetry의 기원에 관한 연구 및 이를 통한 자연계 3종의 쿼크중(family) 예측 subatomic physics에서 자발적인 broken symmetry 메커니즘 발견
2009	Charles Kuen Kao Willard S. Boyle George E. Smith	광통신용 광섬유에서의 광전달 연구 imaging semiconductor circuit인 CCD 센서 발명
2010	Andre Geim Konstantin Novoselov	2차원 material graphene에 관한 획기적 실험
2011	Saul Perlmutter Brian P. Schmidt Adam G. Riess	초신성 관찰을 통해 우주 가속팽창 발견

나. 노벨 화학상

연도	수상자	업적
1901	Jacobus Henricus van 't Hoff	화학동역학 법칙 및 삼투압 발견
1902	Hermann Emil Fischer	당과 푸린 합성에 관한 연구
1903	Svante Arrhenius	전기해리이론
1904	William Ramsay	공기 중 비활성 기체원소의 발견과 주기율표 내 위치 결정
1905	Adolf von Baeyer	유기염료와 히드로방향족 화합물 연구
1906	Henri Moissan	플루오린의 분리와 무아상 전기로 연구
1907	Eduard Buchner	비세포적 발효 발견과 연구
1908	Ernest Rutherford	원소의 분열과 방사능 물질의 화학에 대한 연구
1909	Wilhelm Ostwald	촉매, 화학평형과 반응속도에 관한 선구적 연구
1910	Otto Wallach	지방족 고리화합물의 선구적 연구
1911	Marie Curie	라듐 및 폴로늄 발견, 라듐 분리, 라듐의 성질과 라듐화합물 연구

1913	Alfred Werner	분자 내에서의 원자의 결합 연구로 무기화학의 새로운 분야 개척
1914	Theodore William Richards	많은 화학원소의 정확한 원자량 측정
1915	Richard Martin Willstätter	식물 색소, 특히 클로로필에 관한 연구
1918	Fritz Haber	원소로부터 암모니아 합성
1920	Walther Hermann Nernst	열화학 분야에 관한 연구
1921	Frederick Soddy	방사성 물질의 화학동위원소의 기원과 성질에 관한 연구
1922	Francis William Aston	질량분석사진기를 이용한 비방사성 동위원소 발견 및 정수법칙 발표
1923	Fritz Pregl	유기 물질의 미량분석법 개발
1925	Richard Adolf Zsigmondy	콜로이드 용액의 불균일 특성의 설명
1926	Theodor Svedberg	분산계에 대한 연구
1927	Heinrich Otto Wieland	담즙산 및 관련 물질의 조성에 관한 연구
1928	Adolf Otto Reinhold Windaus	콜레스테롤의 구조와 비타민과의 연관성에 관한 연구
1929	Arthur Harden Hans Karl August Simon von Euler-Chelpin	당의 발효와 발효효소에 관한 연구
1930	Hans Fischer	헤민과 엽록소 구성성분 중 헤민 합성에 기여
1931	Carl Bosch Friedrich Bergius	화학적 고압방법의 발명과 개발
1932	Irving Langmuir	표면화학에 대한 발견과 연구
1934	Harold Clayton Urey	중수소에 대한 연구
1935	Frédéric Joliot Irène Joliot-Curie	새로운 방사성원소 합성
1936	Peter Debye	기체 내의 쌍극자모멘트와 엑스선 및 전자의 회절 연구
1937	Walter Norman Haworth Paul Karrer	탄수화물 및 비타민 C 연구와 카로티노이드, 플라빈, 비타민 A와 비타민 B2 연구
1938	Richard Kuhn	카로티노이드와 비타민 연구
1939	Adolf Butenandt Leopold Ruzicka	성 호르몬 연구 폴리메틸렌 및 폴리터펜 연구

1946	James Sumner John Howard Northrop Wendell Meredith Stanley	효소의 결정화 발견 순수 형태의 효소 및 바이러스 단백질 제조
1947	Robert Robinson	생물학적으로 중요한 식물 생성물, 특히 알칼로이드 연구
1948	Arne Tiselius	전기영동 및 흡착분석에 관한 연구
1949	William Francis Giaque	극저온에서 물질의 거동에 관한 연구
1950	Otto Paul Hermann Diels Kurt Alder	다이엔합성의 발견과 개발
1951	Edwin McMillan Glenn Theodore Seaborg	트랜스우라늄 원소의 발견과 연구
1952	Archer Martin, Richard Synge	분배 크로마토그래피 발명
1953	Hermann Staudinger	거대분자 연구
1954	Linus Carl Pauling	화학결합의 특성 연구
1955	Vincent du Vigneaud	폴리펩타이드 호르몬의 최초 합성
1956	Cyril Norman Hinshelwood Nikolay Nikolaevich Semenov	화학반응 메커니즘에 관한 연구
1957	Alexander R. Todd	뉴클레오티드류와 뉴클레오티드 조효소에 대한 연구
1958	Frederick Sanger	단백질, 특히 인슐린 구조에 대한 연구
1959	Jaroslav Heyrovsky	폴라로그래피의 발견과 개발
1960	Willard Frank Libby	방사성 탄소연대측정법 개발
1961	Melvin Calvin	식물의 탄소동화작용에 관한 연구
1962	Max Ferdinand Perutz John Cowdery Kendrew	구형 단백질 구조에 관한 연구
1963	Karl Ziegler Giulio Natta	고분자 화학과 기술 분야 연구
1964	Dorothy Crowfoot Hodgkin	엑스선 기술로 중요한 생화학 물질의 구조결정
1965	Robert Burns Woodward	유기합성 기술의 뛰어난 연구
1966	Robert S. Mulliken	분자의 화학결합 및 전기적 구조에 관한 연구
1967	Manfred Eigen Ronald Norrish George Porter	초고속 화학반응에 관한 연구

1969	Derek H. R. Barton Odd Hassel	특정 유기화합물의 3차원적 형태결정에 대한 연구
1970	Luis F. Leloir	당뉴클레오티드의 발견과 탄수화물의 생합성에서 그 역할 연구
1971	Gerhard Herzberg	자유 라디칼의 구조에 관한 연구
1972	Christian B. Anfinsen Stanford Moore William H. Stein	아미노산 서열과 생체활성형태의 연관성 연구 리보뉴클레아제 내 활성센터의 화학구조와 촉매활동 간의 연관성 연구
1973	Ernst Otto Fischer Geoffrey Wilkinson	샌드위치 화합물 화학에 관한 선구적 연구
1974	Paul J. Flory	고분자 물리화학의 발전에 기여
1975	John Warcup Cornforth Vladimir Prelog	효소 - 촉매반응의 입체화학 연구 유기분자와 유기반응의 입체화학 연구
1976	William N. Lipscomb	보란의 구조에 대한 연구
1977	Ilya Prigogine	비평형 열역학, 특히 소산 구조론 연구
1978	Peter D. Mitchell	생물학적 에너지이동 과정의 공식화
1979	Herbert C. Brown Georg Wittig	유기물질 합성에 붕소와 인 화합물 도입
1980	Paul Berg Walter Gilbert Frederick Sanger	혼성 DNA와 관련된 핵산의 생화학적 기초 연구 핵산 염기서열 결정에 공헌
1981	Kenichi Fukui Roald Hoffmann	화학반응 경로에 관한 이론
1982	Aaron Klug	결정학적 전자현미경 개발과 핵산 - 단백질 복합체의 구조 규명
1983	Henry Taube	금속 착물의 전자이동반응 메커니즘 연구
1984	Robert Bruce Merrifield	고체기질 위에서의 화학합성 방법론 개발
1985	Herbert A. Hauptman Jerome Karle	분자의 결정구조를 직접 알아내는 방법 개발
1986	Dudley R. Herschbach Yuan T. Lee John C. Polanyi	화학의 기본과정 동역학에 대한 기여에 의해서
1987	Donald J. Cram Jean-Marie Lehn Charles J. Pedersen	높은 선택성의 구조 - 특이적 상호작용을 갖는 분자의 개발과 사용

1989	Sidney Altman Thomas R. Cech	RNA가 촉매성질을 가짐을 발견
1990	Elias James Corey	유기합성에 대한 이론과 방법론에 대한 개발
1991	Richard R. Ernst	고해상도의 NMR분광법의 개발에 대한 기여
1992	Rudolph A. Marcus	화학계에서의 전자전달반응에 대한 이론을 성립하는데 기여한 공로
1993	Kary B. Mullis Michael Smith	DNA기반 화학방법론의 개발에 대한 공로
1994	George A. Olah	탄소양이온 화학에 대한 공헌
1995	Paul J. Crutzen Mario J. Molina F. Sherwood Rowland	대기화학, 정확히는 오존층 파괴에 관한 연구
1996	Robert F. Curl Jr. Harold W. Kroto Richard E. Smalley	풀러렌을 발견
1997	Paul D. Boyer John E. Walker Jens C. Skou	ATP 합성 반응의 기초를 이루는 효소 기작에 대한 설명 막경유 ATPase의 일종인 Na ⁺ K ⁺ -ATPase의 발견
1998	Walter Kohn John A. Pople	밀도함수이론의 개발 양자 화학의 계산방법론의 개발
1999	Ahmed H. Zewail	펨토초 분광법을 이용한 화학반응의 전이단계에 대한 연구
2000	Alan J. Heeger Alan G. MacDiarmid Hideki Shirakawa	전도성 고분자의 발명과 발견
2001	William S. Knowles Ryoji Noyori K. Barry Sharpless	키랄성을 갖고 촉매되는 수소첨가반응에 대한 작업 키랄성을 갖고 촉매되는 산화반응에 대한 작업
2002	John B. Fenn Koichi Tanaka Kurt Wüthrich	생체고분자의 구조적 분석과 동정을 위한 방법론의 개발
2003	Peter Agre Roderick MacKinnon	세포막상의 이온 채널을 발견
2004	Aaron Ciechanover Avram Hershko Irwin Rose	유비퀴틴이 관여된 단백질의 분해를 발견

2006	Roger D. Kornberg	유전자 정보 전사과정연구
2007	Gerhard Ertl	표면 화학 분야에 대한 새로운 연구
2008	Osamu Shimomura Martin Chalfie Roger Y. Tsien	특정한 세포의 활동을 육안으로 볼 수 있는 도구로 사용되는 녹색형광단백질(GFP)을 발견하고 발전시킨 공로
2009	Venkatraman Ramakrishnan Thomas A. Steitz Ada E. Yonath	리보솜의 구조와 기능에 대한 연구
2010	Richard F. Heck Ei-ichi Negishi Akira Suzuki	팔라듐의 촉매반응 개발 공로
2011	Dan Shechtman	준결정 상태의 발견

다. 노벨 생리의학상

년도	수상자	수상 연구
1901	Emil Adolf von Behring	혈청을 이용한 디프테리아 치료법의 발견
1902	Ronald Ross	말라리아의 인체 침투 경로에 대한 연구
1903	Niels Ryberg Finsen	광선치료법을 이용한 심상성 낭창 치료 방법 개발
1904	Ivan Petrovich Pavlov	소화 기관의 생리학적 작동 원리에 대한 연구
1905	Robert Koch	결핵균의 발견
1906	Camillo Golgi Santiago Ramón y Cajal	신경계의 구조에 대한 연구
1907	Charles Louis Alphonse Laveran	질병 유발 원생동물에 관한 연구
1908	Ilya Ilyich Mechnikov Paul Ehrlich	면역계에 관한 연구
1909	Emil Theodor Kocher	갑상선에 관한 연구
1910	Albrecht Kossel	세포화학, 특히 단백질과 핵산에 관한 연구
1911	Allvar Gullstrand	수정체의 굴절광학에 대한 연구
1912	Alexis Carrel	혈관 문합술과 장기 이식에 관한 연구
1913	Charles Robert Richet	과민증에 관한 연구

1920	Schack August Steenberg Krogh	모세혈관의 운동 조절 기작에 대한 연구
1922	Archibald Vivian Hill	근육의 열 생산에 대한 연구
	Otto Fritz Meyerhof	근육의 젖산대사와 산소 소비의 관계에 대한 연구
1923	Frederick Grant Banting John James Rickard Macleod	인슐린의 발견
1924	Willem Einthoven	심전도의 기작 발견
1926	Johannes Andreas Grib Fibiger	생쥐에게 유두종성 위종양을 유발하는 선충인 스파이로테라 칼시노마(Spiroptera carcinoma)의 발견
1927	Julius Wagner-Jauregg	마비성 치매의 치료를 위한 말라리아 접종법의 가치에 대한 연구
1928	Charles Jules Henri Nicolle	티푸스에 관한 연구
1929	Christiaan Eijkman	항신경염성 비타민의 발견
	Frederick Gowland Hopkins	성장 촉진 비타민의 발견
1930	Karl Landsteiner	인간의 혈액형 발견
1931	Otto Heinrich Warburg	세포내 호흡효소인 시토크롬의 성질과 작용 방식에 대한 연구
1932	Charles Scott Sherrington Edgar Douglas Adrian	뉴런의 기능들 발견
1933	Thomas Hunt Morgan	유전 현상에서 염색체의 역할 규명
1934	George Hoyt Whipple George Richards Minot William Parry Murphy	빈혈에 대한 간(肝) 치료법 발견
1935	Hans Spemann	개체의 초기 발생시기에서 형성체 효과 발견
1936	Henry Hallett Dale Otto Loewi	신경충격의 화학적 전달에 대한 연구
1937	Albert von Nagyrápolc	생물학적 연소 과정에 대한 연구
1938	Corneille Heymans	동(sinus)과 대동맥의 호흡 조절 기작에 대한 연구
1939	Gerhard Domagk (수상 거부)	프론토질(Prontosil)의 항균 효과 발견
1943	Henrik Carl Peter Dam	비타민 K의 발견

1945	Alexander Fleming Ernst Boris Chain Howard Walter Florey	페니실린과 그 치료 효과에 대한 발견
1946	Hermann Joseph Muller	X선에 의해 돌연변이가 발생할 수 있음을 밝힘
1947	Carl Ferdinand Cori Gerty Theresa Cori née Radnitz	글리코겐의 축매 전환 과정에 대한 연구
	Bernardo Alberto Houssay	당 대사과정에서의 뇌하수체 전엽 호르몬의 역할 발견
1948	Paul Hermann Müller	살충제 DDT의 발견
1949	Walter Rudolf Hess	중뇌의 기능 발견
	Antonio Caetano de Abreu Freire Egas Moniz	백질절제술의 치료적 가치 발견
1950	Edward Calvin Kendall Tadeus Reichstein Philip Showalter Hench	부신피질 호르몬의 발견 및 구조와 기능에 대한 연구
1951	Max Theiler	황열병에 관한 연구
1952	Selman Abraham Waksman	최초의 결핵치료제인 스트렙토마이신의 발견
1953	Hans Adolf Krebs	TCA 회로의 발견
	Fritz Albert Lipmann	조효소 A의 발견
1954	John Franklin Enders Thomas Huckle Weller Frederick Chapman Robbins	척추성 소아마비 바이러스의 배양 방법 발견
1955	Axel Hugo Theodor Theorell	산화 효소의 작용 방식과 성질에 대한 연구
1956	André Frédéric Cournand Werner Forssmann Dickinson W. Richards	심장도관술과 순환계의 병리학적 변화에 대한 연구
1957	Daniel Bovet	혈관계와 골격근의 작용을 저해하는 합성 물질에 대한 연구
1958	George Wells Beadle Edward Lawrie Tatum	물질대사를 조절하는 유전자에 관한 연구
	Joshua Lederberg	세균의 유전물질 구조 및 유전자 재조합에 대한 연구
1959	Severo Ochoa Arthur Kornberg	DNA와 RNA의 생물학적 합성 기작에 대한 연구

1961	Georg von Békésy	달팽이관 자극의 물리적 전달 기전의 발견
1962	Francis Crick James Watson Maurice Wilkins	DNA의 분자 구조 및 생체 내 기능에 대한 발견
1963	John Carew Eccles Alan Lloyd Hodgkin Andrew Fielding Huxley	신경세포막의 말초 및 중심부의 흥분과 억제에서 나타나는 이온 전달 기작에 대한 발견
1964	Konrad Bloch Feodor Lynen	콜레스테롤과 지방산의 대사에 대한 연구
1965	François Jacob André Lwoff Jacques Monod	효소의 유전적 조절 작용과 바이러스 합성에 대한 연구
1966	Peyton Rous	종양을 일으키는 바이러스의 발견
	Charles Brenton Huggins	호르몬을 이용한 전립선암의 치료 방법 개발
1967	Ragnar Granit Haldan Keffer Hartline George Wald	시각의 생리·화학적 과정 발견
1968	Robert W. Holley Har Gobind Khorana Marshall W. Nirenberg	단백질 합성에 있어서의 유전 암호 해독과 그 기능에 대한 연구
1969	Max Delbrück Alfred D. Hershey Salvador E. Luria	바이러스의 복제 기작과 유전적 구조 발견
1970	Bernard Katz Ulf von Euler Julius Axelrod	신경말단에서의 체액성 전달물질에 관한 연구
1971	Earl W. Sutherland, Jr.	호르몬의 작용 기전 발견
1972	Gerald M. Edelman Rodney R. Porter	항체의 화학적 구조 발견
1973	Karl von Frisch Konrad Lorenz Nikolaas Tinbergen	동물의 행동에 대한 연구
1974	Albert Claude Christian de Duve George E. Palade	세포의 구조 및 기능에 대한 연구
1975	David Baltimore Renato Dulbecco Howard Martin Temin	종양 바이러스와 세포 유전물질의 상호작용 발견

1977	Roger Guillemin Andrew V. Schally	뇌하수체 호르몬의 발견
	Rosalyn Yalow	펩티드 호르몬의 방사성 면역 측정법(Radioimmunoassay) 개발
1978	Werner Arber Daniel Nathans Hamilton O. Smith	제한효소의 발견과 그 이용에 대한 연구
1979	Allan M. Cormack Godfrey N. Hounsfield	컴퓨터 단층 촬영술(CAT 또는 CT)의 개발
1980	Baruj Benacerraf Jean Dausset George D. Snell	면역반응을 조절하는 세포 표면의 유전적 구조체 발견
1981	Roger W. Sperry	대뇌 반구에 관한 연구
	David H. Hubel Torsten N. Wiesel	뇌에 의한 시각의 정보화 과정에 대한 연구
1982	Sune K. Bergström Bengt I. Samuelsson John R. Vane	프로스타글란딘 및 이와 관련된 생물학적 활성 물질에 대한 연구
1983	Barbara McClintock	전이성 유전인자(Transposable element)의 발견
1984	Niels K. Jerne Georges J.F. Köhler César Milstein	면역체계의 특이적 발달과 조절 이론, 그리고 단일클론항체 생산 원리에 대한 연구
1985	Michael S. Brown Joseph L. Goldstein	콜레스테롤 대사 조절에 대한 연구
1986	Stanley Cohen Rita Levi-Montalcini	세포 성장을 촉진하는 성장 인자의 발견
1987	Susumu Tonegawa	다양한 항체를 생성하는 유전학적 원리 규명
1988	Sir James W. Black Gertrude B. Elion George H. Hitchings	약물 치료의 중요한 원칙 발견
1989	J. Michael Bishop Harold E. Varmus	발암성 레트로바이러스에 관한 연구
1990	Joseph E. Murray E. Donnall Thomas	생체기관과 질병 치료를 위한 세포 이식에 관한 발견
1991	Erwin Neher Bert Sakmann	세포의 단일이온채널의 기능 발견

1993	Richard J. Roberts Phillip A. Sharp	절단유전자의 발견
1994	Alfred G. Gilman Martin Rodbell	G-단백질의 발견과 세포 내 신호전달 체계에서의 기능 연구
1995	Edward B. Lewis Christiane Nüsslein-Vollhard Eric F. Wieschaus	초기 배아 분화를 조절하는 유전자 무리인 호메오박스(Homeobox) 발견
1996	Peter C. Doherty Rolf M. Zinkernagel	세포에 의한 면역방어체계의 특이성에 관한 발견
1997	Stanley B. Prusiner	감염을 일으키는 단백질 분자인 프리온의 발견
1998	Robert F. Furchgott Louis J. Ignarro Ferid Murad	심혈관 시스템에서 신경전달물질로서 기능하는 일산화질소에 관한 연구
1999	Günter Blobel	세포 내 단백질 이동 경로를 규정하는 고유한 신호전달 체계의 발견
2000	Arvid Carlsson Paul Greengard Eric R. Kandel	신경계의 신호 전달에 대한 발견
2001	Leland H. Hartwell Tim Hunt Sir Paul M. Nurse	세포주기의 핵심 조절 인자 발견
2002	Sydney Brenner H. Robert Horvitz John E. Sulston	생체기관의 발생과 세포예정사의 유전학적 조절에 대한 발견
2003	Paul C. Lauterbur Peter Mansfield	자기공명영상(MRI)에 관한 연구
2004	Linda B. Buck Richard Axel	냄새 수용체와 후각 시스템의 구조에 대한 발견
2005	Barry J. Marshall J. Robin Warren	위궤양과 위염을 초래하는 헬리코박터 파일로리균의 발견
2006	Andrew Z. Fire Craig C. Mello	이중나선 RNA에 의한 RNA 간섭현상(RNAi) 발견
2007	Mario R. Capecchi Sir Martin J. Evans Oliver Smithies	생쥐의 배아줄기세포를 이용한 유전자 적중법 발견
2008	Harald zur Hausen	자궁경부암을 유발하는 인간 유두종 바이러스(HPV)의 발견

2009	Elizabeth H. Blackburn Carol W. Greider Jack W. Szostak	염색체가 말단소립(텔로미어, Telomere) 및 말단소립 복제효소(Telomerase)에 의해 보호되는 원리 발견
2010	Robert G. Edwards	체외수정(IVF) 기술을 통한 최초 시험관 아기의 탄생
2011	Bruce A. Beutler Jules A. Hoffmann Ralph M. Steinman	면역체계 활성화를 위한 핵심 원칙 발견

부록2. 울프상, 래스커상 목록 (1980년 이후)

가. 울프물리학상

연도	수상자	수상 연구	노벨상 수상자
1980	Michael E. Fisher Leo P. Kadanoff Kenneth G. Wilson	물질의 열역학적 상전이에 관한 이론	1982 Wilson
1981	Freeman J. Dyson Gerard 't Hooft Victor F. Weisskopf	양자 장이론 발전 및 응용	1999 Hooft
1982	Leon M. Lederman Martin Lewis Perl	3세대 쿼크, 렙톤의 새로운 입자 발견	1988 Lederman 1995 Perl
1983/4	Erwin Hahn Peter B. Hirsch Theodore H. Maiman	핵스핀 에코와 self-induced transparency 연구 transmission electron microscope의 유용성을 발전시킴 pulsed three level ruby 레이저 개발 (최초의 레이저)	
1985	Conyers Herring Philippe Nozieres	금속 내 전자의 행동에 관한 이론	
1986	Mitchell J. Feigenbaum Albert J. Libchaber	비선형 시스템 연구가 지니는 일반적 특성을 이론적으로 보임. 카오스에 대한 체계적 연구	

1987	Herbert Friedman Bruno B. Rossi Riccardo Giacconi	태양 X선 연구 extra-태양 X선원 발견과 그 물리적 과정 규명	2002 Giacconi
1988	Roger Penrose Stephen W. Hawking	우주특이점의 필요성과 블랙홀의 특성을 보인 일반상대론 연구	
1989	No Award		
1990	Pierre-Gilles de Gennes David J. Thouless	복잡 응집물질 연구, 드 젤은 폴리머와 액정 연구, Touless는 disordered and low dimensional system 연구	1991 Gennes
1991	Maurice Goldhaber Valentine L. Telegdi	렙톤에 관한 약력 연구	
1992	Joseph H. Taylor Jr.	회전 라디오 펄사 연구(이중 펄사)를 통한 일반 상대론 입증	1993 Taylor
1993	Benoît Mandelbrot	프랙탈의 widespread occurrence를 보이고, 이를 수학적으로 묘사할 수 있는 방법을 개발	
1994/5	Vitaly L. Ginzburg Yoichiro Nambu	초전도체 연구와 천체물리학의 고에너지 과정 이론 자발적 대칭성 붕괴를 초전도체 이론에 유비하여 밝히고, 강력의 color symmetry 발견	2003 Ginzburg 2008 Nambu
1995/6	No award		
1996/7	John Archibald Wheeler	블랙홀 물리학, 양자중력, 핵산란과 핵분열 연구	
1998	Yakir Aharonov Michael V. Berry	양자 topological and geometrical phases 발견, Aharonov-Bohm 효과, Berry Phase 발견	

1999	Dan Shechtman	준-결정, non-periodic solids 발견으로. 물질의 새로운 근본 상태 탐구의 장을 엮	
2000	Raymond Davis Jr. Masatoshi Koshiha	뉴트리노 검출, 뉴트리노 천문학 분야 창시	2002 Davis Koshiha
2001	No award		
2002/3	Bertrand I. Halperin Anthony J. Leggett	Leggett는 가벼운 헬륨 동위체의 초유체와 macroscopic quantum phenomena에 대한 연구, Halperin은 two-dimensional melting, disordered systems and strongly interacting electrons	2003 Leggett
2004	Robert Brout François Englert Peter W. Higgs	아원자 입자의 세계에서 local gauge symmetry가 asymmetrical해 질 때의 mass generation에 대한 연구	
2005	Daniel Kleppner	수소 메이저, 리드버그 원자, 보스-아인슈타인 응축에 대한 연구	
2006/7	Albert Fert Peter Grünberg	거대 자기저항 발견으로 스핀트로닉스의 새로운 연구 및 응용 분야를 창시함	2007 Fert, Grünberg
2008	No Award		
2009	No Award		
2010	John F. Clauser Alain Aspect Anton Zeilinger	entangled quantum states를 이용하여 Bell's inequality를 검증하는 일련의 실험 고안	
2011	Maximilian Haider Harald Rose Knut Urban	picometer의 정밀도로 개별 원자들을 관찰할 수 있는 aberration-corrected electron microscopy 개발	

나. 올프화학상

연도	수상자	수상 연구	노벨상 수상자
1980	Henry Eyring	absolute rate theory 발전과 그것을 화학과 물리학에 창의적으로 적용	
1981	Joseph Chatt	synthetic transition metal chemistry, 특히 particularly transition metal hydrides와 dinitrogen complexes에서의 선구적인 업적	
1982	John Charles Polanyi	적외선 화학적 발광 기술을 개발하여 구체적인 화학 반응 연구를 가능케 했으며, 화학적 레이저의 가능성을 예고	
	George C. Pimentel	matrix isolation spectroscopy 개발 및 photodissociation lasers 와 chemical lasers의 발견	
1983/4	Herbert S. Gutowsky	핵자기공명을 개발하고 그것을 화학에 적용하는 데 선구적인 업적	
	Harden M. McConnell	상자성 공명 분광학을 통해 분자의 전기적 구조를 연구하고, spin label techniques을 생물학에 적용	
	John S. Waugh	고체에서의 고해상도 핵자기공명 분광학에 대한 중요한 이론적·실험적 공헌	
1984/5	Rudolph A. Marcus	화학 반응 속도, 특히 unimolecular reactions과 electron transfer reactions에 대한 이론적 공헌	1992 Marcus
1986	Elias James Corey Albert Eschenmoser	천연물, 특히 비타민-B12의 합성, 입체화학, 반응 메커니즘에 대한 탁월한 연구	1990 Corey
1987	David C. Phillips David M. Blow	단백질 X선 결정학에 대한 공헌, 효소의 구조와 그것의 작용 메커니즘 규명	

1988	Joshua Jortner Raphael David Levine	역동적인 선택성과 특이성을 위한 분자 시스템과 메커니즘에서 에너지를 획득하고 잃어버리는 것에 관한 포괄적인 이론적 연구	
1989	Duilio Arigoni Alan R. Battersby	효소반응과 천연물의 생합성 메커니즘(특히 pigments of life)을 규명하는데 중요한 공헌	
1990	No award		
1991	Richard R. Ernst Alexander Pines	핵자기공명 분광학(특히 Fourier-transform과 two-dimensional NMR)에서의 탁월한 공헌	1991 Ernst
1992	John Pople	이론 화학(특히 현대 양자-화학 방법으로 널리 효과적 사용되는 방법을 개발)에 탁월한 공헌	1998 Pople
1993	Ahmed Hassan Zewail	laser femtochemistry를 개발하여 화학반응을 실시간으로 연구할 수 있는 가능성을 열었음	1999 Zewail
1994/5	Richard Lerner Peter Schultz	catalytic antibodies를 개발함으로써 classical chemical procedures로는 불가능했던 화학반응의 촉매작용을 가능하게 함	
1995/6	Gilbert Stork Samuel J. Danishefsky	복잡한 분자(특히 polysaccharides나 생물학적으로 의학적으로 중요한 화합물)를 합성할 수 있는 새로운 화학반응을 설계하고 개발함	
1996/7	No award		
1998	Gerhard Ertl Gabor A. Somorjai	표면과학 분야에 탁월한 공헌, 입자의 single crystal surfaces에서 일어나는 heterogeneous 촉매반응의 중요한 메커니즘을 규명	2007 Ertl

1999	Raymond U. Lemieux	oligosaccharides에 합성 및 연구에 중요한 공헌을 했으며, 그것이 생체 시스템의 molecular recognition에서 어떤 역할을 하는지 규명	
2000	Frank Albert Cotton	단일 혹은 다중 결합에 의해 연결된 금속 원자들의 쌍과 clusters에 기초한 transition metal chemistry의 새로운 영역을 개척	
2001	Henri B. Kagan Ryōji Noyori K. Barry Sharpless	chiral molecules의 합성을 위한 비대칭 촉매작용을 개발하는 데 선구적이고 창의적인 공헌.	2001 Noyori, Sharpless
2002/3	No award		
2004	Harry B. Gray	생체-무기물 화학에서 선구적인 공헌(생체-무기물 구조와 단백질 내에서 long-range electron이 전달되는 새로운 원리를 규명)	
2005	Richard N. Zare	레이저 기술을 분석화학 및 분자의 복잡한 메커니즘을 규명하는 데 독창적으로 적용	
2006/7	Ada Yonath George Feher	펩타이드 결합을 만들어내는 ribosomal machinery의 독특한 구조 발견 광합성에서 빛에 의해 유도되는 1차적 과정을 발견	
2008	William E. Moerner Allen J. Bard	단일 분자 분광학과 전자화학이라는 새로운 영역을 개척	
2009	No award		
2010	No award		
2011	Stuart A. Rice Ching W. Tang Krzysztof Matyjaszewski	유기물질을 합성하고 특성을 이해하는 화학 분야에 중요하고 독창적인 공헌	

다. 올프의학상

연도	수상자	수상 연구	노벨상 수상자
1980	Cesar Milstein Leo Sachs James L. Gowans	lymphocytes의 면역학적 역할에 대한 연구를 통해 생체 세포의 기능과 분포를 이해하는 데 중요한 공헌 특정 항체를 개발하고 정상세포와 암세포를 통제하고 분화시키는 메커니즘을 규명	1984 Milstein
1981	Barbara McClintock	트랜스포존의 발견(염색체의 구조적 행동과 기능을 이해하는데 중요한 공헌)	1983 McClintock
	Stanley N. Cohen	유전공학 기술의 이론적 토대를 마련(재조합 DNA 기술을 이용하여 외래 유전자를 E. Coli에서 발현)	1986 Cohen
1982	Jean-Pierre Changeux	acetylcholine receptor의 분리, 정제, 특성 규명.	
	Solomon H. Snyder	신경전달물질 수용체의 특성을 규명하는 도구로서 그것에 label을 붙이는 방법을 개발	
	James W. Black	beta adrenergic과 histamine receptor을 block하는 agents를 개발	1988 Black
1983/4	No award		
1984/5	Donald F. Steiner	기초생물학과 임상의학에 적용되는 인슐린의 생합성과 가공에 관계된 발견	

1986	Osamu Hayaishi	oxygenase 효소의 발견과 그것의 구조 및 생물학적 중요성 규명	
1987	Pedro Cuatrecasas Meir Wilchek	affinity chromatography의 발명과 그것을 생의학에 적용	
1988	Henri G. Hers Elizabeth F. Neufeld	lysosomal storage diseases를 생화학적으로 규명하여 생물학, 병리학, 태아검진, 치료학 등에 공헌	
1989	John Gurdon	xenopus oocyte를 분자생물학 연구에 도입하고 분화된 세포와 난자 세포의 핵은 염색물질이 아니라 분화에서만 차이가 있음을 규명	
	Edward B. Lewis	body segments가 homeotic 유전자에 의해 유전적으로 어떻게 통제되는지를 규명	1995 Lewis
1990	Maclyn McCarty	박테리아의 형질전환 요소는 DNA이며 유전물질이 DNA로 구성되어 있다는 것을 발견	
1991	Seymour Benzer	신경 시스템과 유전자 변이에 의한 행동에 관한 선구적 연구를 통한 molecular neurogenetics 분야 개척	
1992	M. Judah Folkman	angiogenesis 연구 분야를 개척	
1993	No award		
1994/5	Michael J. Berridge Yasutomi Nishizuka	인지질과 칼슘을 포함하는 cellular transmembrane 신호전달에 관계된 발견	

1995/6	Stanley B. Prusiner	프리온 발견	1997 Prusiner
1997	Mary Frances Lyon	포유류 X-chromosomes의 random inactivation에 관련된 가설 제안	
1998	Michael Sela Ruth Arnon	면역학에서의 주요한 발견	
1999	Eric R. Kandel	단기기억이 장기기억으로 전환되는 것과 관련된 유기체적, 세포적, 분자적 메커니즘 규명	2000 Kandel
2000	No award		
2001	Avram Hershko Alexander Varshavsky	intracellular protein degradation의 ubiquitin 시스템 발견과 세포조절에서 이 시스템의 중요성을 발견	2004 화학상 Hershko
2002/3	Ralph L. Brinster	transgenesis를 가능케 하는 mouse의 난자와 배아를 manipulate하는 procedure를 개발하고 이것을 mice에도 적용	
	Mario Capecchi Oliver Smithies	mice에서 유전자의 기능을 규명할 수 있는 gene-targeting 기술을 개발	2007 Capecchi Smithies
2004	Robert A. Weinberg	oncogene에 의해 이상증식 현상을 보이는 인간의 종양세포를 포함하는 암세포 발견	
	Roger Y. Tsien	세포의 신호전달을 분석하기 위해 형광분자를 생물학적으로 적용	2008 화학상 Tsien

2005	Alexander Levitzki	신호전달 치료의 선구적 업적 / 항암에 효과적인 agent로서 tyrosine kinase 개발	
	Anthony R. Hunter	protein kinases(phosphorylate tyrosine residues in proteins)를 발견하고, 그것이 다양한 세포 작용을 통제하는데 중요하다는 것을 규명	
	Anthony J. Pawson	세포 신호전달 과정에서 단백질 간 상호작용을 매개하는 단백질 domain의 발견 (암 연구에 중요한 통찰을 제공)	
2006/7	No award		
2008	Howard Cedar Aharon Razin	유전자 발현 조절에 DNA methylation의 역할을 이해하는 데 중요한 공헌	
2009	No award		
2010	Axel Ullrich	신약개발을 이끈 groundbreaking cancer research	
2011	Shinya Yamanaka Rudolf Jaenisch	피부세포로부터 induced pluripotent stem cells (iPS cells)을 개발 iPS cell이 포유류의 유전적 질병을 치료할 수 있음을 보여줌	

라. 래스커 기초의학상 목록

연도	이름	주요업적	노벨상 수상자
1980	Paul Berg Herbert Boyer Stanley Cohen A. Dale Kaiser	<ul style="list-style-type: none"> • 재조합 DNA 기술 개발 • 재조합 DNA 기술에 중요한 공헌(효소학, 플라스미드, 합성 DNA 등) • 재조합 DNA 기술에 중요한 공헌(최초로 유전자를 세포에 이식) • 재조합 DNA 기술에 중요한 공헌(cohesive single-stranded DNA에 관한 연구) 	1980 Berg
1981	Barbara McClintock	<ul style="list-style-type: none"> • 트랜스포존(이동 유전자) 발견 	1983 McClintock
1982	J. Michael Bishop Raymond Erikson Hidesaburo Hanafusa Harold Varmus Robert Gallo	<ul style="list-style-type: none"> • oncogenes의 본성 규명 및 그것이 정상 세포에도 존재함을 발견 • oncogenes이 생산하는 단백질을 분리하고 그것의 기능을 규명 • RNA tumor viruses가 어떻게 암을 유발하는지 설명 • cellular oncogenes과 그것의 조절 기작을 연구 • leukemias와 lymphomas의 원인이 되는 RNA tumor virus를 처음으로 발견 	1989 Bishop Varmus
1983	Eric Kandel Vernon Mountcastle	<ul style="list-style-type: none"> • 학습과 기억에 관한 행동 연구에 세포생물학 기술을 적용 • 정보를 조직하고 수용된 감각을 행동으로 전환하는 뇌의 능력에 관한 연구 	2000 Kandel
1984	Michael Potter César Milstein Georges Köhler	<ul style="list-style-type: none"> • immunoglobulin molecules에 관한 유전학적 연구를 통해 hybridomas 개발에 도움 • hybridomas를 최초로 개발 	1984 Milstein Köhler

1985	Michael Brown Joseph Goldstein	<ul style="list-style-type: none"> 콜레스테롤 대사의 기본적인 메커니즘을 규명 	1985 Brown Goldstein
1986	Rita Levi-Montalcini Stanley Cohen	<ul style="list-style-type: none"> nerve growth factor 발견 epidermal growth factor (EGF) 발견 및 기능 규명 	1986 Levi-Montalcini Cohen
1987	Leroy Hood Philip Leder Susumu Tonegawa	<ul style="list-style-type: none"> 항체 다양성에 관한 유전학적 연구 carcinogenesis에 관한 연구 항체 생성의 유전학적 원리 규명 	1987 Tonegawa
1988	Thomas Cech Phillip Sharp	<ul style="list-style-type: none"> RNA의 효소 기능에 관한 연구 RNA processing에 관한 연구를 통해 DNA가 방대한 생물학적 정보를 저장하는 방식을 규명 	1989 화학 Cech 1993 Sharp
1989	Michael Berridge Alfred Gilman Edwin Krebs Yasutomi Nishizuka	<ul style="list-style-type: none"> 세포내 IP₃의 기능(칼슘 농도 및 세포 기능 조절)에 관한 연구 G-단백질의 발견 및 세포내 신호전달에서 그것의 역할 규명 인산화가 세포내 효소를 활성화시킨다는 사실을 규명(특히 protein kinase 효소에서 중요) 발암물질이 protein kinase C를 활성화시켜 세포의 성장을 촉진한다는 사실을 규명 	1992 Krebs 1994 Gilman
1990	No Award		
1991	Edward Lewis Christiane Nüsslein-Volhard	<ul style="list-style-type: none"> Bithorax complex에 관한 연구를 통해 배아 발생에서 homeotic genes의 역할 규명 거의 모든 유전자가 신체 패턴의 조직화에 역할 한다는 것을 발견 	1995 Lewis Nüsslein-Volhard
1992	No Award		

1994	Stanley Prusiner	<ul style="list-style-type: none"> • 새로운 유형의 감염인자인 프리온의 발견 	1997 Prusiner
	<p>Peter Doherty Rolf Zinkernagel</p> <p>Jack Strominger</p> <p>Emil Unanue</p> <p>Don Wiley</p>	<ul style="list-style-type: none"> • For the epochal discovery of MHC restriction of T-cell recognition에서 MHC restriction발견과 single T-cell receptor altered-self 가설 제안 • class I과 class II MHC 단백질 그리고 그것의 펩타이드 복합체 분리 및 구조 규명 • antigen processing과 T-cell recognition에서 MHC-peptide binding의 역할 규명 • class I and class II proteins 및 그것과 항원 복합체의 3차원적 구조 규명 	1996 Doherty Zinkernagel
1996	<p>Robert Furchgott</p> <p>Ferid Murad</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 지금은 산화질소라고 알려진 EDRF(내피 세포성 이완인자)에 관한 중요한 발견 • 심혈관을 비롯한 기타 질병을 치료하는 데 적용될 수 있는 발견 • 산화질소의 cyclic GMP 신호전달 경로 규명 / EDRF와 산화질소를 연결하는 중요한 발견들 	1998 Furchgott
1997	Mark Ptashne	<ul style="list-style-type: none"> • 조절 단백질이 유전자의 전사를 어떻게 조절하는지에 관한 이해를 이끈 연구 	
1998	<p>Lee Hartwell</p> <p>Paul Nurse</p> <p>Yoshio Masui</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 모든 진핵생물의 세포 분열을 조절하는 universal machinery에 관한 선구적인 유전적/분자적 연구 	2001 Hartwell Nurse
1999	<p>Clay Armstrong</p> <p>Bertil Hille</p> <p>Roderick MacKinnon</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 전위막을 조절함으로써 신경자극을 일으키고 근수축, 심박동, 호르몬 분비를 조절하는 이온 채널 단백질의 기능과 구조를 규명 	
2000	<p>Aaron Ciechanover</p> <p>Avram Hershko</p> <p>Alexander Varshavsky</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 세포주기, 악성 변이, 염증 및 면역 반응을 포함하는 세포 내 사건들에 영향을 주는 fundermantal process인 유비퀴틴 시스템의 광범위한 중요성을 발견 & 인지 	2004 화학상 Ciechanover Hershko

			Smithies
2002	James E. Rothman Randy W. Schekman	<ul style="list-style-type: none"> • 막 운반체의 budding과 fusion을 조정하는 보편적인 분자 기구에 관한 발견 - 영양 섭취, 호르몬 분비, 세포 소기관 형성의 핵심적인 과정 - 	
2003	Robert G. Roeder	<ul style="list-style-type: none"> • 진핵세포 RNA 중합효소와 동물 세포 내 유전자 발현에 관한 생화학적 분석을 가능케 한 일반적인 전사 기구에 관한 선구적인 연구 	
2004	Pierre Chambon Ronald M. Evans Elwood V. Jensen	<ul style="list-style-type: none"> • 핵 호르몬 수용체의 슈퍼패밀리를 발견 & 배아발생과 다양한 대사 경로를 조절하는 통합 메커니즘을 규명 	
2005	Ernest McCulloch James Till	<ul style="list-style-type: none"> • 줄기세포(조혈모세포)를 최초로 추출해낸 독창적 실험 • 현재의 모든 성체/배아 줄기세포 연구의 토대가 됨 	
2006	Elizabeth Blackburn Carol Greider Jack Szostak	<ul style="list-style-type: none"> • 텔로머레이즈의 예측과 발견 	2009 Blackburn Greider Szostak
2007	Ralph Steinman	<ul style="list-style-type: none"> • 외부 항원에 대한 신체 반응을 일으키고 조절하는 면역계의 중요한 요소인 dendritic cell(돌기세포) 발견 	
2008	Victor Ambros David Baulcombe Gary Ruvkun	<ul style="list-style-type: none"> • 식물과 동물에서 유전자 기능을 조절하는 tiny RNA와 관련된 발견 	
2009	John Gurdon Shinya Yamanaka	<ul style="list-style-type: none"> • 분화된 성체 세포를 초기 줄기세포로 만들어서 모든 종류의 세포가 될 수 있는 잠재력을 가지도록 핵을 재프로그램하는 것과 관련된 발견 	
2010	Douglas K. Coleman Jeffrey M. Friedman	<ul style="list-style-type: none"> • 식욕과 몸무게를 조절하는 호르몬인 leptin의 발견 • 이를 통해 비만에 대한 분자적 접근을 가능케함 	
2011	Franz-Ulrich Hartl Arthur L. Horwich	<ul style="list-style-type: none"> • 체내에서 합성된 단백질에 생물학적 활성을 부여하는 단백질 접힘과정에 관한 발견 	

부록3. 톰슨-로이터 인용상 수상자 목록*

가. 물리학

연도	수상자	업적	노벨상 수상자
1990	David J. Gross Frank A. Wilczek	강한 상호작용에서 점근 자유성에 관한 발견	2004 Gross Wilczek
2002	Michael B. Green John H. Schwarz Edward Witten	string theory	
	Shuji Nakamura	nitride가 포함된 III-V 반도체(gallium nitride)를 기반으로 한 광원 연구에 기여함.	
	Yoshinori Tokura	특이한 전하(charge)와 스핀 배열을 가진 전이 금속 산화물의 합성 및 특성 연구.	
2006	Alan H. Guth Andrei Linde Paul J. Steinhardt	우주 팽창 이론의 창시.	
	Masataka Nakazawa David N. Payne	EDFA (erbium-doped fiber amplifiers) 개발로 선구적 업적을 남김.	
	Albert Fert Peter Gruenberg	거대한 자기저항 발견	2007 Fert Gruenberg
2007	Sumio Iijima	탄소 나노 튜브의 발견. 물리학, 화학, 생물학 분야에서의 0차, 1차 나노 구조를 연구함으로써 나노과학 분야를 탄생시키는 데 많은 영향을 끼침.	

* Tompson-Reuters 홈페이지 참조. <http://ip-science.thomsonreuters.com/nobel/laureates/> (2011. 1. 15. 접속). 2006년 이전에는 일부만 수록되어 있음.

	Arthur B. McDonald	세 가지 종류가 있다고 알려져 있는 중성미자가 충분히 장거리를 이동할 때 세 종류를 오가며 변화한다는 것을 밝히고 중성미자가 질량을 가지고 있음을 밝혀냄.	
	Lord Rees of Ludlow	암흑물질(dark matter)이 우주의 생성과 특성을 설명하는 데 중요하다는 것을 밝혀내고 초기 상태의 별과 우주 생성기에 대한 observational test를 제안.	
2008	Roger Penrose	Penrose quasicrystals의 발견.	
	Vera C. Rubin	우주의 angular motion에 대한 예측치와 관측치 사이 불일치를 발견.	
	Andre K. Geim Kostya Novoselov	2차원 material graphene에 관한 획기적 실험	2010 Geim Novoselov
2009	Yakir Aharonov Sir Michael V. Berry	양자(quantum)의 위상적, 기하학적 단계 발견. 특히 다양한 물리학 분야에서 Aharonov-Bohm 효과, Berry phase가 나타나고 서로 결합되는 것을 발견.	
	Juan Ignacio Cirac Peter Zoller	양자 계산과 양자 정보 이론 분야의 선도.	
	Sir John B. Pendry David R. Smith	음의 굴절(negative refraction).	
2010	Charles L. Bennett Lyman A. Page David N. Spergel	Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) 분석을 통한 우주의 나이, 위상, 구성 성분의 발견.	
	Thomas W. Ebbesen	subwavelength hole을 통과하는 빛에 대한 관측과 설명을 통해 surface plasmon photonics 분야 형성을 촉진.	
	Saul Perlmutter Adam G. Riess Brian P. Schmidt	초신성 관찰을 통해 우주 가속팽창 발견	2011 Perlmutter Riess Schmidt
2011	Alain Aspect John F. Clauser Anton Zeilinger	벨의 부등식에 관한 테스트와 양자적 얽힘에 관한 연구	

	Sajeev John Eli Yablonovitch	포토닉 밴드갭 물질의 발명과 개발	
	Hideo Ohno	약화 된 자성 반도체에서의 페로자성에 대한 연구	

나. 화학

연도	수상자	업적	노벨상 수상자
1990	Elias J. Corey	유기합성에 대한 이론과 방법론에 대한 개발	1990 Corey
	George A. Olah	탄소양이온 화학에 대한 공헌	1994 Olah
	Alan J. Heeger	전도성 고분자의 발명과 발견	2000 Heeger
1997	John A. Pople	양자 화학의 계산방법론의 개발	1998 Pople
	Ahmed H. Zewail	펨토초 분광법을 이용한 화학반응의 전이단계에 대한 연구	1999 Zewail
	Ryoji Noyori K. Barry Sharpless	키랄성을 갖고 촉매되는 산화반응에 대한 연구	2001 Noyori Sharpless
	Richard R. Schrock	올레핀의 구조와 메커니즘을 처음으로 규명	2005 Schrock

2002	Adriaan Bax	단백질의 resonance assignment를 밝히기 위한 triple resonance 실험의 개발에 기여, 잔기의 양극성 coupling을 통한 RNA와 단백질 구조 결정에 기여.	
	K.C. Nicolaou	의학 분야에서 잠재적 활용 가능성을 가진, 자연에서 발견되는 복잡한 화합물에 대한 합성 방법을 개발.	
	J. Fraser Stoddart	분자의 mechanically-interlocked 구조를 사용해 nanomechanical system을 설계할 수 있다는 것을 밝힘.	
	George M. Whitesides	NMR 분광학, 유기금속화학, 분자의 self-assembly, soft lithography, microfabrication, microfluidics, 나노기술 등의 분야에 기여.	
2003	Seiji Shinkai	분자의 self-assembly에 대한 선구적 연구.	
	Robert H. Grubbs	복분해 반응 및 복분해 반응을 유도하는 촉매물질 개발	2005 Grubbs
2006	David A. Evans	알돌 반응 연구, 음이온 oxy-Cope의 rearrangement 방법 개발, 금속 촉매의 hydroboration 반응, bis-oxazoline (box) 리간드를 기반으로 한 촉매적이고 광학위치선택적인 반응에 대한 연구.	
	Steven V. Ley	선구적인 유기화학 연구와 합성 방법론에 대한 기여.	
	Tobin J. Marks	합성 organo-f-element, 앞전이금속에 대한 금속 유기화학 연구, 고분자 화학, 재료 화학, 균일 및 불균일 촉매 반응 등에 관한 중요 연구.	
	Stuart L. Schreiber	생물학적 기작을 밝히기 위한 작은 분자의 체계적 사용법을 개발하고 그에 맞는 도구 개발.	
2007	Dieter Seebach	합성 유기화학 분야의 새로운 방법론 개발	
	Samuel J. Danishefsky	새로운 항암물질인 epothilones와 같은 자연물질의 합성을 통해 생물학적으로 활용 가능한 유기화합물 연구에 기여.	
	Barry Trost	유기화학, 유기금속화학, 생화학 분야에 걸친 광범위한 기여.	

2008	Krzysztof (Kris) Matyjaszewski	'living' polymerization 방법이라 불리는 atom transfer radical polymerization (ATRP) 방법 등의 개발.	
	Charles Lieber	nanowires, nanomaterials의 변형과 그것의 응용에 관한 연구.	
	Roger Tsien	특정한 세포의 활동을 육안으로 볼 수 있는 도구로 사용되는 녹색형광단백질(GFP)을 발견하고 발전시킨 공로	2008 Tsien
	Dan Shechtman	준결정 상태의 발견	2011 Shechtman
2009	Michael Grätzel	dye sensitized mesoscopic oxide particles을 이용한 새로운 종류의 태양 전지 개발, 리튬 이온 전지에 나노 물질의 사용법 개발.	
	Jacqueline K. Barton Bernd Giese	DNA-mediated charge transfer의 생물학적 역할을 입증.	
	Benjamin List	organic asymmetric catalysis에 관한 연구	
2010	Patrick O. Brown	DNA microarrays를 발명하여 유전자 발현의 variation을 연구하는 데 적용	
	Susumu Kitagawa Omar M. Yaghi	porous metal-organic frameworks을 설계하고 개발하여 수소와 메탄 저장, 가스정화 등에 적용	
	Stephen J. Lippard	DNA 복제를 방해하는 metallointercalators를 발견하고 그것을 암치료에 적용	
2011	Allen J. Bard	scanning electrochemical microscopy 개발과 적용	
	Martin Karplus	biomolecules의 molecular dynamics를 자극하는 것에 관한 선구적인 연구	
	Jean M. J. Fréchet / Donald A. Tomalia / Fritz Vögtle	dendritic polymers의 발명과 발전	

다. 생리의학

연도	수상자	업적	노벨상 수상자
1989	J. Michael Bishop Harold E. Varmus	발암성 레트로바이러스에 관한 연구	1989 Bishop Varmus
	Edwin G. Krebs	생체 조절 기전에서 나타나는 가역단백질 인산화에 관한 연구	1992 Krebs
	Alfred G. Gilman	G-단백질의 발견과 세포 내 신호전달 체계에서의 기능 연구	1994 Gillman
	Eric R. Kandel	신경계의 신호 전달에 대한 발견	2000 Kandel
	Sydney Brenner	생체기관의 발생과 세포예정사의 유전학적 조절에 대한 발견	2002 Brenner
	Luc Montagnier	후천성 면역 결핍 증후군(AIDS)를 유발하는 인간 면역 결핍 바이러스(HIV)의 발견	2008 Montagnier
2002	Sir Michael J. Berridge	인지질과 칼슘을 포함하는 cellular transmembrane 신호전달에 관계된 발견	
	Francis S. Collins Eric S. Lander J. Craig Venter	Human Genome Project (HGP).	
	Alfred G. Knudson Jr.	carcinogenesis의 변이 효과를 설명할 수 있는 Knudson hypothesis 제안	
	Bert Vogelstein	p53유전자의 역할(DNA 수선 및 수선이 불가능한 DNA를 가진 세포를 파괴) 규명	
	Robert A. Weinberg	oncogene에 의해 이상증식 현상을 보이는 인간의 종양세포를 포함하는 암세포 발견	
2006	Pierre Chambon Ronald M. Evans Elwood V. Jensen	nuclear hormone receptors의 superfamily를 발견하고 배아발달과 다양한 대사과정에서 그것의 역할을 규명	

	Sir Alec J. Jefferys	DNA profiling (DNA fingerprinting)	
	Mario R. Capecchi Sir Martin Evans Oliver Smithies	생쥐의 배아줄기세포를 이용한 유전자 적중법 발견	2007 Capecchi Evans Smithies
2007	R. John Ellis Arthur Horwich F. Ulrich Hartl	세포내에서 chaperone-assisted protein folding에 관한 중요한 발견 및 그것이 신경발생과 어떤 연관이 있는지를 규명	
	Fred H. Gage	포유류의 뇌에서 adult neurogenesis의 생리학적 역할을 발견	
	Joan Massague	정상 조직의 발달 및 암에 의한 변화와 관련된 신호전달 메커니즘에 관한 연구(TGF β 와 cytokine compound 연구)	
2008	Victor R. Ambros Gary Ruvkun	microRNA의 발견 및 그것이 유전자 조절에 어떤 역할을 하는지 규명	
	Rory Collins Richard Peto	meta-analysis의 개발과 적용을 통해 임상학과 전염병학 연구에 공헌	
	Bruce A. Beutler Jules A. Hoffmann Ralph M. Steinman	면역체계 활성화를 위한 핵심 원칙 발견	2011 Beutler Hoffman Steinman
2009	James E. Rothman Randy Schekman	막 운반체 이동(vesicle transport)에 관한 연구	
	Seiji Ogawa	Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) 발명	
	Elizabeth H. Blackburn Carol W. Greider Jack W. Szostak	염색체가 말단소립(텔로미어, Telomere) 및 말단소립 복제효소(Telomerase)에 의해 보호되는 원리 발견	2009 Blackburn Greider Szostak

2010	Douglas L. Coleman Jeffrey M. Friedman	식욕과 대사를 조절하는 호르몬인 leptin의 발견	
	James E. Till Shinya Yamanaka	줄기세포 발견 iPs(역분화 줄기세포 개발)	
	Ralph M. Steinman		2011 Steinman
2011	Robert L. Coffman Timothy R. Mosmann	T lymphocytes의 두 유형(TH1과 TH2)을 발견하고 숙주의 면역 반응을 조절하는 데 그것의 역할을 규명	
	Brian J. Druker Nicholas B. Lydon Charles L. Sawyers	만성 골수성 백혈병을 효과적으로 치료할 수 있는 imatinib과 dasatinib를 개발	
	Robert S. Langer Joseph P. Vacanti	조직공학과 재생의학에서의 선구적인 연구	
	Jacques F. A. P. Miller	감상선의 기능을 규명하고 포유류에서 T 세포와 B 세포를 identification	

부록4. 노벨심포지엄목록(1990년이후)과
참석자 중 노벨상 수상자 명단

가. 물리학

연도	번호	주 제	노벨상 수상자
1990	NS 79	The Birth and Early Evolution of Our Universe	Frank Wilczek (2004, 물리) David J. Gross (2004, 물리) Gerardus't Hooft (1999, 물리)
1991	NJS 91-1	Low Dimensional Properties of Solids	P. W. Anderson (1977, 물리) J. R. Schrieffer (1972, 물리)
1992	NS 85	Heavy Ion Spectroscopy and QED Effects in Atomic Systems	
1994	NS 91	Particle Traps and Related Fundamental Physics	William D. Phillips (1997, 물리) N. F. Ramsey (1989, 물리) H. Dehmelt (1989, 물리)
1995	NS 98	Barred Galaxies and Circumnuclear Activity	
1996	NS 99	Heterostructures in Semiconductors	H. Kroemer (2000, 물리) Z. I. Alferov (2000, 물리) K. von Klitzing (1985, 물리)
1997	NS 104	Modern Studies of Basic Quantum Concepts and Phenomena	C. Cohen-Tannoudji (1997, 물리) Willis E. Lamb (1955, 물리)
1998	NS 109	Particle Physics and the Universe	
2000	NS 116	Quantum Chaos	참석자 명단 없음
2000	NS 117	The Physics and Chemistry of Clusters	참석자 명단 없음
2001	NCS 2001-1	Condensation and Coherence in Condensed Systems	Anthony Leggett (2003, 물리) Carl E. Wieman (2001, 물리) Eric A. Cornell (2001, 물리) Wolfgang Ketterle (2001, 물리) Alan J. Heeger (2000, 물리) Zhores I. Alferov (2000, 물리) Robert B. Laughlin (1998, 물리) Steven Chu (1997, 물리) Claude Cohen-Tannoudji (1997, 물리) William D. Phillips (1997, 물리) David M. Lee (1996, 물리) Douglas D. Osheroff (1996, 물리) Robert C. Richardson (1996, 물리) Klaus von Klitzing (1985, 물리) Philip W. Anderson (1977, 물리) Leo Esaki (1973, 물리)

2004	NS 129	Neutrino Physics	A. Suzuki (2010, 화학)
2005	NS 131	Controlled nanoscale Motions in Biological and Artificial Systems	
2005	NS 132	Alfred Nobel Symposium: Energy in Cosmos, Molecules and Life	Gerhard Ertl (2007, 화학) Richard Axel (2004, 생리학) Roderick MacKinnon (2003, 화학) Eric R. Kandel (2000년, 생리학) Ahmed Zewail (1999, 화학) Carlo Rubbia (1984, 물리)
2006	NS 133	Cosmic Chemistry and Molecular Astrophysics	Yuan T. Lee (1986, 화학)
2007	NS 135	Physics of Planetary Systems	참석자 명단 없음
2009	NS 141	Qubits for Future Quantum Information	관련 홈페이지 없음
2010	NS 148	Physics of Graphene	K. Novoselov (2010, 물리) F. Wilczek (2004, 물리)
2011	NS 149	3M: Machines, Molecules and Mind	

나. 화학

연도	번호	주 제	노벨상 수상자
1991	NS 81	Conjugated Polymers and Related Materials	A. J. Heeger (2000, 화학) Hideki Shirakawa (2000, 화학) A. G. MacDiarmid (2000, 화학) K. Fukui (1981, 화학)
1992	NS 84	Early Life on Earth	
1991	NJS91-2	CO ₂ -fixation and CO ₂ -reduction in Biological and Model Systems	
1995	NS 97	Catalytic Asymmetric Synthesis	R. Noyori (2001, 화학) Karl Barry Sharpless (2001, 화학)
1996	NS 101	Femtochemistry and Femtobiology: Ultrafast Reaction Dynamics at Atomic Scale Resolution	Ahmed Zewail (1999, 화학) Rudolph A. Marcus (1992, 화학)
2001	NCS 2001-2	Frontiers of Molecular Science	
2003	NS 126	Membrane Proteins: Structure Functions and Assembly	참석자 명단 없음
2004	NS 130	Molecular Mechanisms in Biological Systems	Elisabeth Blackburn (2009, 화학) Ada Yonath (2009, 화학) Thomas A. Steitz (2009, 화학) Roger Y. Tsien (2008, 화학) Roger Komberg (2006, 화학) Günther Blobel (1999, 화학) Thomas Cech (1989, 화학) Aaron Klug (1982, 화학)

2008	NS 138	Single Molecule Spectroscopy in Chemistry, Physics and Biology	관련 홈페이지 없음
2011	NS 149	3M: Machines, Molecules and Mind	공통

다. 생리학

연도	번호	주 제	노벨상 수상자
1990	NS 80	Etiology of Human Disease at the DNA Level	Oliver Smithies (2007, 생리학) Mario R. Capecchi (2007, 생리학) Joseph L. Goldstein (1985, 생리학) Michael S. Brown (1985, 생리학)
1992	NS 83	Biological Function of the Gangliosides	Gerald Edelman (1972, 생리학)
1993	NS 86	Toward a Molecular Basis of Alcohol Use and Abuse	
1994	NS 89	Individual Development in a Lifespan Perspective	Gerald M. Edelman (1972, 생리학)
1994	NS 90	Mitochondrial Diseases	J. E. Walker (1997, 생리학)
1991	NJS 91-3	Control of Embryonic Development	참석자 명단 없음
1996	NS 94	The Nature - Nurture Controversy	
1996	NS 100	Functional Organization of the Eukaryotic Cell Nucleus	
1997	NS 103	Towards an Understanding of Integrative Brain Functions. Analyses at Multiple Levels	Paul Greengard (2000, 생리학) Eric Kandel (2000, 생리학) Bert Sakmann (1991, 생리학) Gerald M. Edelman (1972, 생리학)
1998	NS 106	Intracellular and Persistent Infections	Stanley Prusiner (1997, 생리학) Rolf Zinkernagel (1996, 생리학)
1998	NS 111	Schizophrenia: Pathophysiological Mechanisms	Arvid Carlsson (2000, 생리학) Paul Greengard (2000, 생리학) Gerald M. Edelman (1972, 생리학)
1999	NS 113	Estrogens and Women's Health - Benefit or Threat?	
2000	NS 114	Prevention and Treatment of Tuberculosis in the Coming Century	참석자 명단 없음
2001	NS 119	Global HIV Therapeutics - HIV Vaccines	참석자 명단 없음
2001	NCS 2001-3	Beyond Genes	Roger Y. Tsien (2008, 화학) Roger Kornberg (2006, 화학) Peter Agre (2003, 화학) Linda Buck (2004, 생리학) Robert Horvitz (2002, 생리학) Eric R. Kandel (2000, 생리학) Günter Blobel (1999, 생리학) Christiane Nüsslein-Volhard (1995, 생리학) Phillip Sharp (1993, 생리학) Bert Sakmann (1991, 생리학) Harold Varmus (1989, 생리학)

			Bengt Samuelsson (1982, 생리의학) Michael S. Brown (1985, 생리의학) Torsten Wiesel (1981, 생리의학) David Baltimore (1975, 생리의학)
2003	NS 121	Self-Organization	참석자 명단 없음
2003	NS 124	Septicemia and Shock	Bruce Beutler (2011, 생리의학)
2004	NS 128	Epigenetic eprogramming in Development and Disease	참석자 명단 없음
2005	NS 132	Alfred Nobel Symposium: Energy in Cosmos, Molecules and Life	공통
2006	NS 134	The Adipocyte: A Multifunctional Cell	참석자 명단 없음
2008	NS 137	Genes, Brain and Behavior	관련 홈페이지 없음
2009	NS 140	Acute Infections Caused by Gram-positive Bacteria	관련 홈페이지 없음
2010	NS 143	Genetics in Medicine	관련 홈페이지 없음
2010	NS 144	The Cell Cycle and Apoptosis in Disease	관련 홈페이지 없음
2010	NS 145	Understanding the Uniqueness of the Human Mind: Neuro-Science of Complex Cognition	관련 홈페이지 없음
2009	NS 146	Systems Biology	관련 홈페이지 없음
2011	NS 149	3M: Machines, Molecules and Mind	공통

부록5. 노벨상 심사과정과 노벨위원회 위원 명단 (1990년 이후)

노벨상의 심사과정을 주관하는 전형 기관(Nobel Prize Awarding Institution)은 정해져 있다. 물리학상과 화학상은 스웨덴 왕립 과학 아카데미(The Royal Swidish Academy of Science)로서 2011년 말 현재 420명의 회원과 175명의 국외회원으로 구성되어 있는데, 노벨 물리학상과 화학상의 노벨 전형위원회(Prize committee for physics and chemistry)는 회원 중에 각각 50명으로 구성되어 있다. 생리의학상은 카롤린스카 연구소(Karolinska Institutet)에서 주관하는 데 역시 연구원 50명으로 노벨회의(The Nobel Assembly at Karolinska Institutet)를 구성한다. 노벨회의의 위원은 퇴임할 때까지 종신제로 운영된다. 노벨회의는 노벨위원회 위원 5명을 선출하여 노벨상 심사 과정을 주관하게 하는데 이 위원회에는 임기 1년의 전문위원을 5-10명 정도 선출하여 전형의 실무를 맡게 된다. 심사과정은 전년도 9월 추천의뢰장의 발송에서 시작한다. 약 3000장정도가 발송되고 1월 말에 추천을 마감한다. 과거의 노벨상 수상자는 종신 추천인의 자격을 지니게 되고, 노벨위원회에서 위촉하는 전문가로서 약 100개 이상의 대학, 연구기관의 전문가에게 추천을 의뢰하는데 발송된 것의 10-20%정도 추천장이 접수된다고 한다. 추천이 없어도 필요하다고 생각되면 노벨 위원회의 위원이 추가로 추천하는 경우도 많이 있다. 2월 1일부터 전형과정이 시작되는데 2월말 까지 추천보고서가 감사위원회에 보고되면 추천보고서에 의한 감사보고서와 함께 3월말까지 전형위원회 사무국장에게 제출되고 검토회의를 거쳐 4월 30일까지 각 시상 위원회의 위원을 선출한다. 그리고 본격적인 선정과정이 시작되는데 1990년 생리의학상 전형위원회 사무국장을 지낸 얀 린드스텐은 “노벨상은 해당 분야에 수여하는 것이다”라고 언급한 바와 같이 그해에 시상할 가장 적절한 분야 5-6개를 5월 말까지 결정한다. 6월에서 8월 말에 걸쳐 때로는 수백 페이지의 보고서로 정리한다. 9월 말까지 가장 중요한 인물과 그 업적에 대한 리스트를 작성하고 후보자를 최대 3명까지 압축한다. 최종결정은 노벨회의의 회원투표에 의하여 다수결로 결정한다. 10월 초에 수상자를 발표하고, 시상식은 노벨이 사망한 날인 12월 10일

에 거행한다.

(참고문헌 : “노벨상 100년” 바바 렌세이 지음, 정성호 옮김, 문학사상사, 2003)

노벨상의 전형과정에서 노벨위원회 위원은 매우 중요한 역할을 한다. 다음에 1990년 이후노벨위원의 명단을 소속과 전공과 함께 표로 요약하였다.

가. 노벨물리위원회 구성

이 름	소 속	전 공	재임 연도
Ingvar Lindgren	Chalmers University of Technology and Göteborg University	atomic physics	1978 - 1991 (chairman 1989 - 1991)
Carl Nordling	Uppsala university	molecular and condensed matter	1985 - 1997 (chairman 1992 - 1995)
Bengt Nagel	Royal Institute of Technology	mathematical physics	1986 - 1997
Erik Karlsson	Uppsala university	material physics (quantum coherence in condensed matter systems, Experiments using neutrons and positive muons on H-containing systems)	1987 - 1998 (chairman 1997 - 1998)
Cecilia Jarlskog	Lund University	theoretical nuclear physics, elementary particle physics, applied mathematical physics and complex systems and chaos	1989 - 2000 (chairman 1999 - 2000)
Tord Claeson	Chalmers University of Technology	superconductivity, carbon nanotubes with spintronics, quantum computing and squids for neural studies	1992 - 2000
Mats Jonson	Chalmers University of Technology (-2005) Gothenburg University (2005-)	nano physics, condensed matter theory, mesoscopic physics	1997 - 2005
Sune Svanberg	Lund University	atomic laser spectroscopy and its application	1998 - 2006
Per Carlson	Royal Institute of Technology	elementary particle physics (astroparticle physics with balloon and satellite experiments)	1999 - 2007
Lennart Stenflo	Umeå University (-2007) Linköping University (2007-)	Plasma physics and space physics	2001 - 2006

Lars Bergström	Stockholm University	Theoretical Physics (cosmology and particle astrophysics, string theory)	현 위원
Lars Brink	Chalmers University of Technology	Theoretical Particle Physics	현 위원
Börje Johansson	Uppsala University	Condensed Matter Physics	현 위원
Björn Jonson	Chalmers University of Technology	Fundamental Physics (subatomic)	현 위원
Ingemar Lundström	Linköping University	Professor of Applied Physics	현 위원
Anne L'Huillier	Lund University	Atomic Physics	현 위원

나. 노벨화학위원회 구성

이름	소속	전공	재임 연도
Sture Forsén	Lund University	Physical Chemistry (NMR, LTH, discovery of saturation transfer method)	1983 - 1995
Ingvar Lindqvist	Swedish University of Agricultural Sciences	Chemistry (Complex Chemistry)	1986 - ?
Björn Roos	Lund University	Theoretical Chemistry / Quantum Chemistry	1988 - 2000
Salo Gronowitz	Lund University	Organic Chemistry (research on Thiophene)	1988 - 1996 (chairman 1991-?)
Bertil Andersson	Stockholm University (현) Nanyang Technological University	Biochemistry (research on chloroplast membranens structure and function, which has led to further Photosynthesis discoveries about light reaction based on protein complex studies in photo system)	1989 - 1997
Carl-Ivar Brändén	ESRF(European Synchrotron Radiation Facility)	Chemical Crystallography	1990 - 2000
Lennart Ebersson	Lund University	Organic Chemistry	1995 - ? (chairman 1997-?)
Ingmar Grenthe	Royal Institute	Inorganic Chemistry (research on chemical nuclear fuel)	1999 - ?
Torvard C. Laurent	Uppsala University	Medical Chemistry (research on hyaluronan and its chemistry as catabolism function, and behaviour disorders)	1996 - 1998

	Directors of the Hasselblad Foundation of Photography and Scientific Research	biological with a connection to medical and molecules and interesting applications)	
Gunnar von Heijne	Stockholm University	Biochemistry (research on cell membrane protein)	2001-2009 (chairman 2007-2009)
Håkan Wennerström	Lund University	Theological Physical Chemistry	2001-2009
Lars Thelander	Umeå University.	Medical Chemistry / Biophysics	현 위원
Jan-Erling Bäckvall	Stockholm University	Organic Chemistry	현 위원
Måns Ehrenberg	Uppsala University	Theoretical Physics and Biophysics (research on fluorescence labelled macromolecule)	현 위원
Astrid Gråslund	Stockholm University	Biophysics	현 위원
Sven Lidin	Lund University	Inorganic Chemistry	현 위원

다. 노벨생리의학위원회 구성

이 름	소 속	전 공	재임 연도
Sten Orrenius	Karolinska Institute	Toxicology	1983 - 2002
Jan Wersäll	Karolinska Institute	Histology	1984 - 1990
Bengt Samuelsson	Karolinska Institute	Medical Chemistry	1984 - ? (chairman 1987 - ?)
Tomas Hökfelt	Karolinska Institute	Histology	1985 - ?
Hans Wigzell	Karolinska Institute	Immunology	1987 - ?
Ralf F. Pettersson	Karolinska Institute	Molecular Biology	1995 - 2000 (chairman 1998 - 2000)
Staffan Normark	Karolinska Institute (~ 1999) Umeå University (2008 ~)	Microbiology(infectious disease control) / Genetic Engineering	1996 - 2001
Sten Lindahl	Karolinska Institute	Anaesthesiology	1997 - 2002 (chairman 2001-2002)

Björn Vennström	Karolinska Institute	Molecular Biology	2001 - 2006
Göran K. Hansson	Karolinska Institute	Cardiology / Immunology	2002 - 2007 (chairman 2004 - 2006)
Erna Möller	Karolinska Institute	Immunology	2003 - 2005
Lars Terenius	Karolinska Institute	Molecular Medicine	2003 - 2005
Nils-Göran Larsson	Karolinska Institute (~ 2008) Max-Planck-Institute (2008 ~)	Medical Genetics	2006 - 2008
Bertil Fredholm	Karolinska Institute	Pharmacology	2004 - 2009 (chairman 2007 - 2008)
Klas Kärre	Karolinska Institute	Immunology	현 위원
Jan Andersson	Karolinska Institute	Infectious Diseases	현 위원
Carlos Ibáñez	Karolinska Institute	Neurobiology	현 위원
Urban Lendahl	Karolinska Institute	medical cell biology / Genetics	현 위원
Rune Toftgård	Karolinska Institute	toxicology	현 위원