

고에너지물리학과 e-Science

| 조 기 현 박사 | e-Science 사업단 응용연구개발팀 | cho@kisti.re.kr |

고에너지물리학이란?

사람들은 오랫동안 생각했다. 세상은 무엇으로 이루어졌으며, 그 사이 어떤 상호작용은 있을까? 고대에는 이 세상이 물, 불, 흙, 공기의 4 원소로 이루어졌다고 생각했다. 그러나 20세기에 들어서 물질은 원자로 이루어져 있으며, 원자는 핵과 그 주위를 도는 전자로 이루어져 있다는 사실을 알아냈다. 19세기말 톰슨이 전자를 발견하고 그 성질을 이해함에 따라 20세기는 전자 문명의 시대가 도래했던 것이다.

과학기술의 발전과 더불어 현대과학은 핵 안의 궁극적인 미세 구조가 무엇이며, 그 사이 상호작용은 어떠한가에 대한 연구, 즉 더 작은 세계로의 연구를 계속 수행하고 있다. 지금까지 잘 알려진 표준모형에 따르면, 핵은 양성자, 중성자로 이루어져 있으며, 양성자, 중성자는 쿼크로 이루어져 있다는 것이다. 이와 같은 기본입자와 그 사이 상호 작용이 무엇인지? 표준모형이 맞는지? 물질의 궁극적인 기본 입자를 전자처럼 이해할 수만 있다면, 앞으로의 세상에는 아무도 상상하지 못하는 입자 문명의 시대가 도래할 수도 있을 것이다.

- 1 표준모형의 기본입자들, 물질 입자는 쿼크 집단(6종류)과 경입자(6종류)로 이루어져있다. 본 연구진은 c 쿼크와 b 쿼크 연구에 관심이 많다.
- 2 쿼크로 이루어진 물질을 하드론(hadrons)이라고 부른다. 그중 쿼크 2개로 이루어진 것을 중간자(meson)라 부르며, 쿼크 3개로 이루어진 것을 바리온(baryon)이라고 부른다.

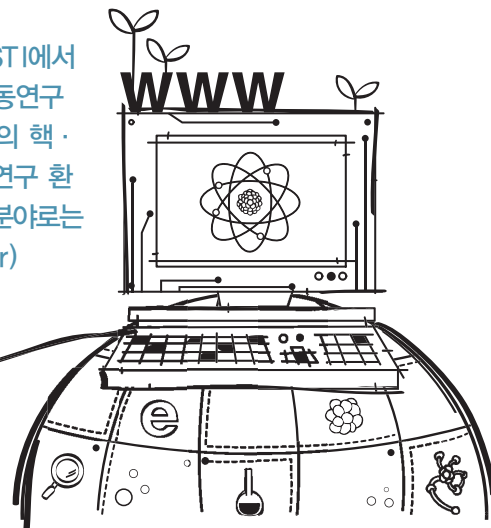
1

Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptons	ν_e e-Neutrino	ν_μ μ -Neutrino	ν_τ τ -Neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
I II III The Generations of Matter			

2



e-Science 연구를 수행하기 위한 기반으로 KISTI에서는 2008년 3월 20일 사이버 한·불 입자물리공동연구소를 개소하였다. 이 공동연구소는 한국과 프랑스의 핵·입자물리연구소(IN2P) 연구자들이 e-Science 연구 환경을 활용하여 입자물리연구를 수행한다. 공동연구분야로는 미래실험인 ILC(International Linear Collider) Calorimeter, ILC electronics R&D, Grid Computing과 Bio분야 등의 연구 수행이 포함되어 있다. 향후 ALICE 실험과 CDF실험 등도 이 프로젝트에 포함될 예정이다.



이러한 물질의 기본입자를 규명하기 위해 우리가 익히 알고 있는 핵을 관찰하게 된다. 핵 속에 있는 기본입자(target)들을 관찰하려면 가속기(source)가 필요하고 가속된 입자가 충돌한 지점에는 대규모의 검출기가 필요하다. 즉, 핵 안의 기본입자를 찾기 위해서는 입자를 가속시켜 충돌하여 그 붕괴 반응을 재구성하여 연구를 수행하는 것이다.

좀 더 이해를 돕기 위해 테니스공을 치는 과정을 생각해보자. 우리가 사물을 관찰할 때 관찰할 소스(source)와 검출기가 필요하다. 예를 들면, 테니스공(target)을 관찰하기 위해서는 눈(eye)으로 테니스공을 살펴보면 된다. 이 때 소스(source)는 광원이 되고, 테니스공이 기본입자(target)가 되며 검출기(detector)는 눈이 된다. 여기에 관찰하고자 하는 대상마다 소스(source)와 검출기(detector)가 다르다는 사실을 추가적으로 이해할 필요가 있다. 은하를 관찰하기 위해서 전파망원경이 필요하며, 세포를 관찰하기 위해서는 현미경이 필요한 것을 생각해 보면 알 수 있다.¹⁾

물질의 기본입자를 알기 위해서 가속기가 필요하다고 했는데, 가속기는 주변에서 많이 볼 수 있다. TV 브라운관도 전자를 가속(2KeV)시켜 형광물질을 때

러서 빛을 보는 것이며, X-ray 사진도 전자를 가속시켜 나오는 빛으로 사진을 찍는 것이다. 그러나 기본 입자를 보기 위해서는 이러한 에너지보다 10억배 정도의 에너지(2TeV)가 큰 고에너지 가속기가 필요하다. 이러한 고에너지 가속기가 필요한 이유는 고에너지의 입자들은 충돌할 때 에너지가 커서 더 작은 입자까지 쪼개서 볼 수 있기 때문이다. 또한 아인슈타인의 상대성 원리에 의하면 질량과 에너지는 같으므로 고에너지는 질량이 큰 기본 입자를 만들 수 있기 때문이다. 고에너지 가속기를 이용하여 물질의 기본입자를 이해하고, 궁극적으로 우주의 초기는 어떤 물질에서 시작되었는지를 규명하여 우주 생성 및 진화에 관한 것을 이해하고자 하는 것이 고에너지 물리학의 연구분야가 되는 것이다.

현재는 고에너지물리 가속기를 통하여 10^{-18}m 정도의 미시 세계를 이해할 수 있는 능력을 지니게 되었다. 원자의 크기가 대략 10^{-10}m 임을 감안한다면 고에너지 실험에서 들여다 볼 수 있는 크기는 상상을 초월할 정도로 작다.²⁾

고에너지물리 e-Science 연구 환경

이러한 고에너지 물리 실험을 수행하기 위한 핵·입자물리실험용 가속기가 애석하게도 한국에는 아직 없다. 이에 국내의 200여 명의 연구자는 가속기가 있는 미국 페르미연구소(Fermilab), 유럽입자물리공동연구소(CERN) 및 일본 고에너지물리가속기연구소(KEK) 등에 직접 방문하여, 그 곳의 컴퓨팅센터를 이용하여 연구를 수행해 오고 있다.

하지만 가속기가 있는 연구소에 방문하여 국내의 연구진들이 연구를 수행하는 것은 시간적,비용적으로 상당히 어려운 문제

이다. 이에 KISTI에 구축하고 있는 고에너지물리 e-Science 연구 환경은 고에너지물리 실험 연구의 새로운 장을 열고 있다. 사이버상으로 가속기가 있는 연구소에 있는 것처럼 연구를 수행하는 꿈의 연구 환경을 구현하고자 하는 것이 고에너지물리 e-Science의 목표인 것이다.

국내연구자들이 가속기 연구소에서 주로 수행하는 내용의 구성 요소를 살펴보면, 데이터 생산, 데이터 프로세싱, 데이터 협업분석이다. 데이터 생산은 가속기가 충돌되는 검출기에서 실시간으로 데이터를 받는 것을 말한다. 가속기는 24시간 365일 가동됨으로 물리학자들은 하루 3교대로 조를 지어서 검출기 제어실에서 데이터를 획득한다. 다음으로 데이터 프로세싱은 생산된 데이터 신호를 물리적인 양으로 바꾸어 주는 단계이다. 지금까지 이러한 처리는 가속기 연구소 내에 있는 컴퓨팅센터에서 주로 담당하였다. 마지막으로 전 세계에서 온 수백여 명의 연구자들이 모여서 데이터를 분석하여 토론하여 물리 결과를 출판하는 협업분석이다. 이러한 일련의 과정을 외국의 가속기 연구소에 가지 않더라도 one-stop으로 연구를 수행하는 것이 고에너지물리 e-Science 연구 환경의 역할인 것이다.

KISTI가 고에너지물리 연구와 관련하여, e-Science

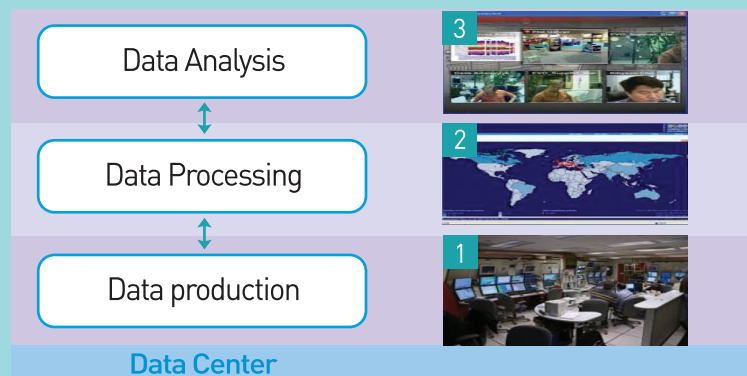
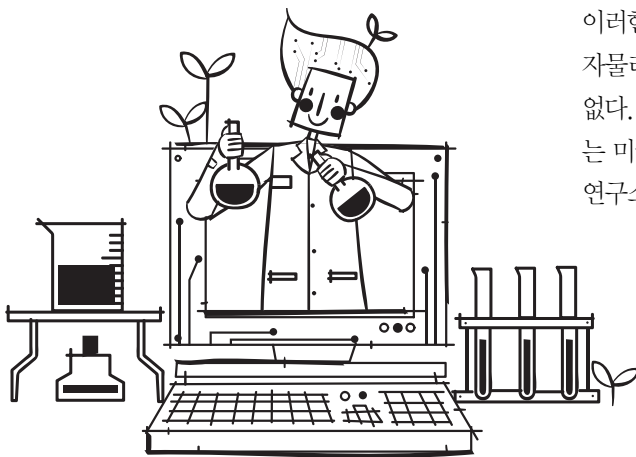
연구환경을 구축하고 있는 사례들을 살펴보면, 미국 페르미연구소의 테바트론 가속기를 이용한 CDF(Collider Detector at Fermilab) 실험과 유럽입자물리공동연구소의 LHC(Large Hadron Collider, 거대강입자충돌기) 가속기를 활용하는 ALICE(A Large Ion Collider Experiment) 실험이 있다.

미국 페르미연구소 CDF 실험은 미국, 이탈리아, 일본, 영국, 독일, 한국, 대만 등 14개국의 625여 명의 물리학자들이 참여하는 대규모의 국제적인 가속기 실험이다. 한국에서는 경북대, 서울대, 성균관대, KISTI, 전남대 등에서 30여 명의 연구자가 참여하고 있다. 이 실험은 2001년에 시작되어 2010년까지 수행될 예정인데, 그 목적은 각각 $1\text{X}1\text{TeV}$ 의 에너지로 가속시킨 양성자와 반양성자들을 정면 충돌시켜 새로운 입자와 물리현상들을 탐구하는 것이다. 실험에 쓰이는 입자의 충돌횟수는 1초에 760만 번이고, 매초 입자 검출기에 기록된 데이터의 크기는



1) 조기현 등, “고에너지물리 데이터 그리드 시스템의 구현”, 정보과학논문지, 제33권, 제7호, p.390~398, (2006).

2) 고에너지물리협의회 기획위원회, 물리학연구정보센터 연구동향사업보고서 R2006-005 “고에너지물리학의 전망” (2006).



③ 고에너지물리 e-Science 연구 환경의 구성요소들. 데이터 생산, 데이터 프로세싱과 데이터 협업분석으로 구성되어 있다.

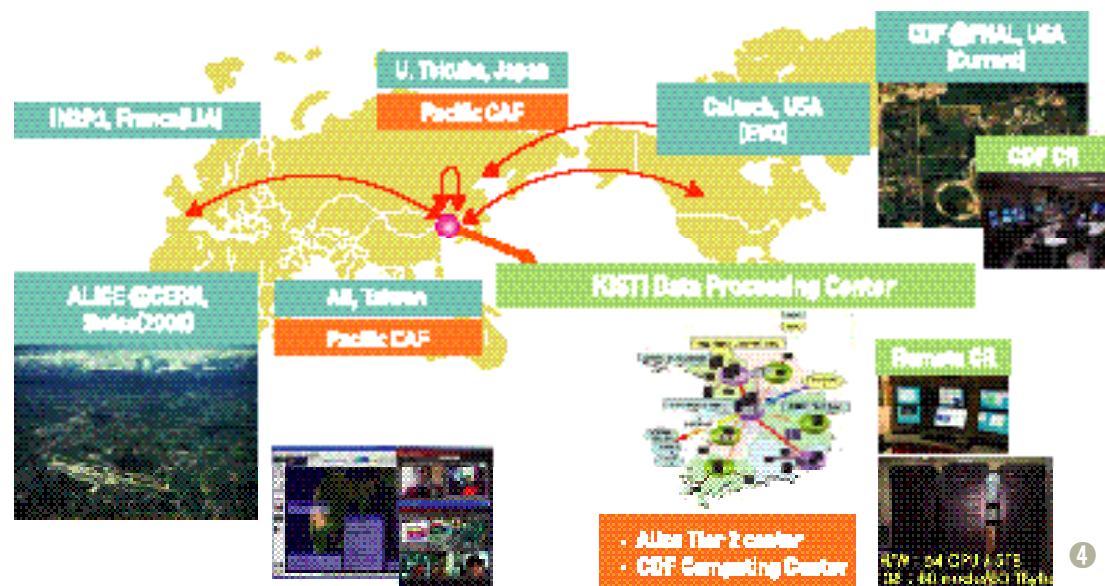
25~40MByte에 달한다. 현재까지 Run II에서 모은 데이터량은 $2fb^{-1}$ 이다. 이것은 30억 개의 사진수에 해당되며, 그 사이즈는 수 PByte이다. 이러한 방대한 데이터를 처리하고 분석하기 위해서는 대용량의 저장장치 및 계산 장치와 네트워크 환경이 구축되어야 한다.

또, 유럽입자물리공동연구소(CERN)에서는 7X 7TeV의 양성자 강입자충돌가속기를 이용하여 ALICE 실험 연구를 수행하고 있다. ALICE 실험은 핵 간의 충돌로 인해 우주 초기의 빅뱅 상태를 만들어 쿼크-글루온(quark-gluon) 플라스마 상태에서 강한 상호작용에 관한 물리적 현상을 연구하는 것이다. ALICE 실험 연구 수행시 생산되는 데이터는 연간 10Peta Byte로 CD로 만들면 20,000m의 높이에 해당된다. 이러한 방대한 양의 데이터는 기존의 개념으로는 처리할 수 없다. 이에 미국에서는 OSG(Open Science Grid) 프로젝트를 중심으로 OSG farm을, 유럽은 EGEE(Enabling Grid for E-Science)를 중심으로 LCG(LHC Computing Grid) farm을 구축하고

있으며, 데이터 처리의 계층적 구조(Tier0, 1, 2)의 개념으로 데이터를 처리하고 있다. 한국은 KISTI에서 LCG 팜을 활용한 Tier2 데이터센터를 구축하여 데이터 처리를 하고 있다.

고에너지물리 e-Science 연구 환경의 구현

KISTI에 구축하고 있는 고에너지물리 e-Science 연구 환경의 구체적 역할을 살펴보면, CDF 실험의 데이터 생산은 가속기가 운영되고 있는 미국 페르미 연구소에서 실험을 하여야 하나, KISTI는 원격제어실을 구축하여 현지에 가지 않고서도 데이터를 획득하여 실험을 할 수 있도록 지원하고 있다. 이로써 국내 연구자들은 데이터 획득을 위한 교대근무를 수행하러 연구소에 직접 방문하지 않아도 되어 2박 3일의 왕복 항공 시간을 절약할 수 있다. 게다가 집에서 출·퇴근하며 교대근무를 수행할 수 있으므로 국제 여행 경비도 절약된다.



또한 데이터 프로세싱으로는 CDF 실험을 위하여 대만, 일본, 한국과 연동되는 Pacific CAF(CDF Analysis Farm)라는 그리드 팜을 구축하여 연구를 수행하고 있으며, ALICE 실험을 위해 ALICE Tier2 데이터 센터를 구축하여 운영하고 있다. Pacific CAF, ALICE Tier2 데이터 센터 연구 환경은 기존 방식에 비해 최고 100분의 1로 전산 프로세싱 시간을 줄여 주며, 개인이 구축해야 하는 막대한 저장장치를 절약할 수 있도록 해 주고 있다.

또한 협업분석 환경으로 EVO(Enabling Virtual Organization) 시스템의 서버를 KISTI에 구축하여 국내 연구자들이 외국의 연구자들과 협업연구를 수행할 때 KISTI의 서버를 활용함으로써 대기시간을 줄일 수 있다. EVO는 따로 소프트웨어 설치가 필요 없으며, 내 노트북에서 웹 접속만으로 한 번에 가능하다는 장점이 있다. 기존의 연구 방법으로 연구를 수행한다면, 실제로 한 장소에서 모여서 회의를 하게 되는데, 시간과 경비가 만만치 않으며, 전화로 다자간 회의를 개최하면, 막대한 국제 전화비용, 자료 공유 및 화상대화 등이 불편하다. 기존의 폴리콕이나 Access Grid를 활용할 수 있으나, 그것은 설치

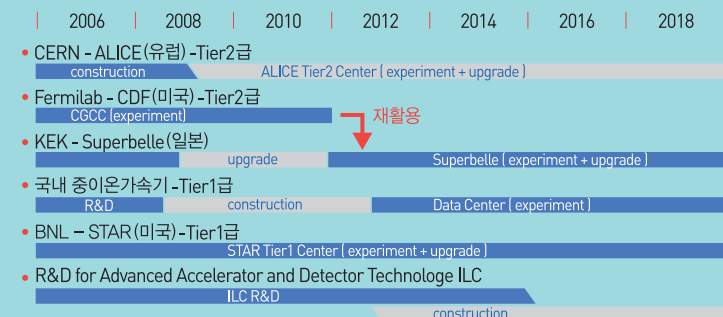
경비가 비싸며, 설치과정이 복잡하다는 단점이 있다.

고에너지물리 분야의 e-Science는 이러한 연구 환경을 one-stop으로 제공함으로써 연구에 시너지 효과를 올릴 수 있도록 하고 있는 것이다. 결국 연구자들은 시간과 공간의 제약을 덜 받으면서 연구를 수행할 수 있게 된 것이다.

이러한 e-Science 연구를 수행하기 위한 기반으로 KISTI에서는 2008년 3월 20일 사이버 한·불 입자물리공동연구소를 개소하였다. 이 공동연구소는 한국과 프랑스의 핵·입자물리연구소(IN2P) 연구자들이 e-Science 연구 환경을 활용하여 입자물리연구를 수행한다. 공동연구분야로는 미래실험인 ILC(International Linear Collider) Calorimeter, ILC electronics R&D, Grid Computing과 Bio분야 등의 연구 수행이 포함되어 있다. 향후 ALICE 실험과 CDF실험 등도 이 프로젝트에 포함될 예정이다.

KISTI에서 구축한 고에너지물리 e-Science 연구 환경은 향후 국내 가속기가 구축 설치될 경우 그 데이터센터가 기존의 KISTI 글로벌 데이터센터와 결합하여 연구에 있어 시너지 효과를 낼 수 있을 것으로 기대된다.

KISTI Roadmap (통합 데이터 센터)



- 4 KISTI의 고에너지물리 e-Science 연구 환경 구현 내용
- 5 국내 고에너지물리 연구자가 연도별로 KISTI 데이터 센터 구축 관련 요구한 수요조사표.

고에너지물리 e-Science 활용 연구

기본 입자들은 필연적으로 서로에게 영향을 미치는데, 이 기본적인 현상을 입자들 간의 상호작용(interaction)이라고 한다. 지금까지 알려진 상호작용에는 다음과 같은 네 가지의 종류가 있다. 중력(gravity), 전자기력(electromagnetism), 약한 핵상호작용(weak interaction)과 강한 핵상호작용(strong interaction)이 바로 그것이다. 실험과 이론 입자물리학에서의 지금까지의 발견을 집대성한 것을 표준 모형(Standard Model)이라고 부르는데, 본 연구진은 아직까지 잘 맞고 있는 표준 모형을 정밀 검증한다. 특히 표준모형에서는 B 중간자의 붕괴에서 CP 대칭성이 깨지는 현상을 실험하고, 이를 통해 쿼크 섞임의 행렬, 즉 CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa) 행렬을 측정하며 희귀 붕괴의 탐색을 통하여 표준 모형을 벗어나는 새로운 물리 법칙인 BSM(Beyond Standard Model)의 존재 여부에 많은 관심이 있다. B 중간자는 현재 일본 KEK Belle 실험, 미국 SLAC의 Babar 실험 및 미국 페르미연구소의 CDF 실험에서 생산이 된다. 미국 페르미연구소 Tevatron의 CDF 실험에서 생산되는 B 중간자의 생성 단면적(cross-section)이 $500\mu\text{b}$ 으로

Belle와 Babar 실험에 비해서 매우 크며, 질량중심 (Center of Mass) 에너지가 2TeV이기 때문에 s 쿼크와 c 쿼크를 포함한 B 중간자와 바리온을 만들어 내므로 우리는 미국 페르미연구소 Tevatron 실험을 “Full service B factory”라 부른다. B 중간자의 희귀 붕괴를 연구하는데 보다 유리한 조건을 제공한다고 할 수 있다. 그러나 Tevatron 실험에서는 배경사건이 크므로, 중성미자가 2개 이상 존재하는 반응들 및 photon 붕괴를 포함하고 있는 반응은 Belle와 Babar 실험이 우수하다. 표준모형이 갖고 있는 현안은 다음과 같다.

1. 표준모형에서 CKM 행렬의 복소위상으로 생기는 CP 비대칭성은 우리 우주에서 관측되는 물질 대 반물질의 불균형을 설명하기에는 부족하다. 그러나 현재까지의 실험 결과는 CKM 행렬에 의한 요인이 외의 CP 대칭성 깨짐을 밝혀내지 못하고 있다.³⁾
2. 쿼크와 경입자들이 약한 상호 작용에 3개의 doublet 구조를 가지는 원인을 여전히 모르고 있다. 특히, 쿼크들과 경입자들간의 구조의 유사성이 우연의 일치인지 아니면 더 근본적인 구조를 암시하는 현상인지도 밝혀지지 않고 있다.⁴⁾
3. CKM 성분 자체에 대해서도 V_{cb} 등은 매우 정밀

하게 측정된 반면에 V_{ub} , V_{td} 등의 정밀도는 이에 미치지 못하고 있다. 특히 V_{td} 등의 측정은 여전히 통계적 오차가 정밀도를 떨어뜨리는 가장 큰 요인이다. 이러한 값의 정밀 측정을 통하여 표준모형의 검증과 BSM의 효과 여부를 알 수가 있을 것이다.⁵⁾

4. s 쿼크나 c 쿼크가 들어가는 B 중간자와 바리온 모드는 최근에 Tevatron 실험에서 발견되었다. 특히 $B_S \rightarrow \psi(2S)\phi$ 붕괴모드는 기존의 B^+, B^0 중간자와 비교함으로써 표준모형을 정밀 검증할 필요가 있으며, 아직은 그 물리적인 이해가 부족함으로 새로운 각도에서 다양한 연구가 필요하다. $B_S \rightarrow \psi(2S)\phi$ 가 2006년 CDF 실험에서 발견된⁶⁾ 이후로 현재는 많은 데이터가 축적되어, CP 비대칭성의 탐색 및 붕괴 메커니즘을 연구가 필요하다. 또한 $\pi\pi$ 를 포함하는 모드를 재구성함으로써 프로덕션 메카니즘도 연구도 필요하다.

향후 2012년 일본 KEK에서 수행될 SuperBelle 실험의 현재 보다 30배 이상의 막대한 데이터가 생산됨으로 일본 KEK 실험에서도 고에너지물리 e-Science 연구 환경은 반드시 필요하며, 축적된 결과를 통하여 BSM의 탐색이 가능할 것으로 기대된다.⁷⁾

맺음말

1989년 유럽입자물리 공동연구소에서 전 세계 분산된 연구자들에게 자료를 나누기 위하여 팀 버너스-리 (Tim Bernes-Lee)가 개발한 WWW(World Wide Web) 프로젝트가 현재 전 세계에서 WWW 혁명을 이루었다. 이와 비견하게 물리적으로 가속기가 없어도 사이버상으로 가속기가 있는 연구환경을 구현해 주는 고에너지물리 e-Science 연구 환경은 향후 WWW와 같은 전자혁명을 이루는데 커다란 기여를 할 것이다. 궁극적으로 e-Science 연구 환경을 통한 입자세계 이해는 우리로 하여금 전자 세계 그 너머를 그릴 수 있도록 도와줄 것이다.



3) 고에너지물리협의회 기획위원회, “고에너지물리학의 전망”, 물리학연구정보센터 연구동향사업보고서 R2006-005, (2006).

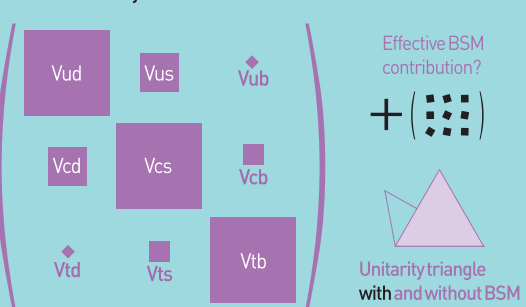
4) 고에너지물리협의회 기획위원회, “고에너지물리학의 전망”, 물리학연구정보센터 연구동향사업보고서 R2006-005, (2006).

5) M.Nakao, “Super B factory-Progress and Prospects”, YongPyong 2008 APCTP Workshop(2008).

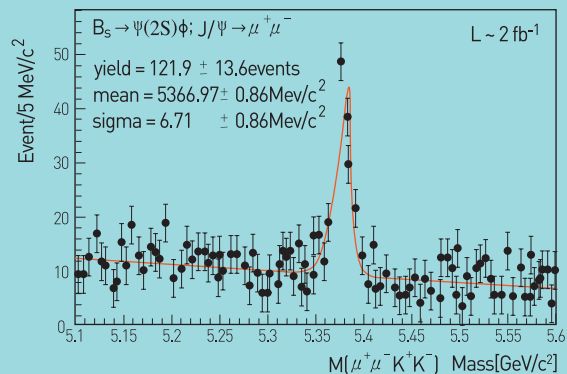
6) CDF Collaboration, Physical Review Letters, 96, 231801 (2006).

7) M.Nakao, “Super B factory-Progress and Prospects”, YongPyong 2008 APCTP Workshop(2008)

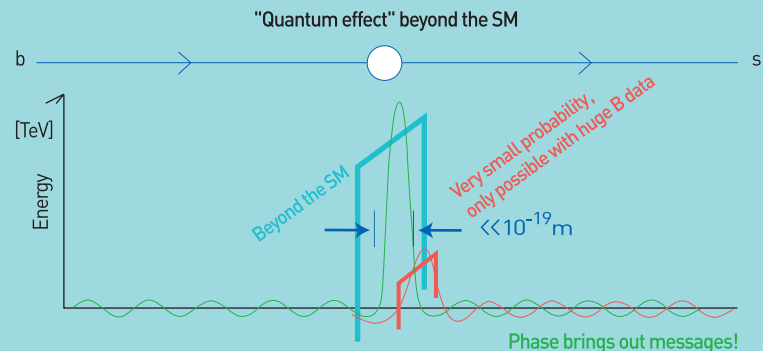
Cabibbo-Kobayashi-Maskawa Matrix



6



7



8

6 표준모형에서의 CKM 행렬요소 크기와 혹시 있을 수 있는 BSM(Beyond Standard Model)의 기여도.

7 미국 페르미연구소 CDF 실험에서 2001년부터 현재까지 생산된 데이터를 이용하여 재구성한 $B_S \rightarrow \psi(2S)\phi$ 붕괴 모드. 2006년의 발견에 이어 지금은 물리적 특성을 연구할 수 있을 정도의 사건 수가 된다.

8 향후 실험인 SuperBelle에서 많은 양의 B 중간자 데이터로 BSM(Beyond Standard Model)을 탐색할 수 있음을 보여주는 개념도.