

学術認証フェデレーション及びSINETサービス説明会 東京会場
12月8日

素粒子物理学実験 BELLEとSINET

高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所
片山伸彦

アウトライン

- × 素粒子物理学とは
- × 素粒子物理学実験とSINET
- × SINET4に期待する

素粒子物理学とは？

- × 我々はどこから来てどこへ行くのか？
- × 宇宙は何でできているのか？
- × どんな法則に支配されているのか？

人類が数千年に渡って考えてきたこれらの疑問に**科学的・実証的**に答えようとする学問



素粒子物理学の標準理論

- × 6種類のクォークとレプトン
 - + 小林・益川理論によるCP対称性の破れ
 - × 4種類の力（相互作用）
 - + 強い力:クォークを陽子・中性子の中に閉じ込める力
 - + 弱い力（ベータ崩壊など）・電磁気力
 - + 重力
 - × ヒッグスメカニズム
 - + **未だ発見されていないヒッグス粒子**による質量の起源を説明するメカニズム
-

我々の知っている事の殆どを説明出来る理論

- + 20世紀始めより素粒子理論・実験の研究者が作り上げて来た理論の集大成

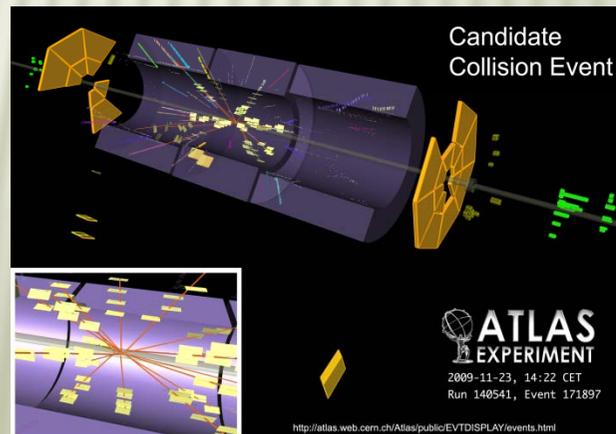
実験とは?

- × 提唱された理論を実証する
 - + 沢山ある理論を選別し、自然を正しく説明出来るもののみを残す
- × 考えてもみなかったような現象を発見する
 - + 科学者の「常識」を覆す

ベル実験



アトラス実験



スーパー
カミオカンデ
実験



2008年ノーベル物理学賞受賞！小林益川理論とは？

Q クォークとは何ですか？

原子核を構成する陽子や中性子は、さらに小さな構成要素（素粒子）からできています。これらはアップ(u)クォークやダウン(d)クォークといったものです(図1)。現在では、u、d以外にもクォークが存在し、全部で6種類あることがわかっています。この6種類のクォークは、電荷の異なる2種類が対になり「世代」という組を作っています(図2)。



Q 反粒子とは何ですか？

クォークや電子のような素粒子には対する反粒子が存在します。粒子と反粒子は、電荷などが反対で、質量は同じです。例えば、負の電荷を持つ電子の反粒子は正の電荷を持つ陽電子です。粒子は反粒子と対で生成され、両者が会ったとき消滅してエネルギーに変換されます。6種類のクォークそれぞれにも、その反粒子が存在し、中間子と呼ばれる粒子はクォーク(q)と反クォーク(anti-q)から出来ています。CP対称性の破れに関与する中間子は、K中間子やB中間子です(図3)。



待ちに待った実験結果！ Bファクトリーによる検証

Q どうして小林益川理論が正しいとわかったのですか？

すべての理論的実験的に証明されなければなりません。加速器技術の発展とともに、1994年までに6種類のクォークが全部発見されました。さらにBファクトリー(工場)実験と呼ばれる日本二つの実験で2001年までにそれぞれ数千万個のB中間子を観測し、B中間子のCP対称性の破れを検出したことにより、従来以来約30年たった、ようやく小林益川理論が正しいことが証明されました。

Q Bファクトリー(工場)とはなんですか？

B中間子を大量に生成し、その性質を調べ、CP対称性の破れを測定するための実験設備のことです。まるで工場のようにB中間子を大量に作り出すためにこの設備があります。小林益川理論に従えば、B中間子で大きなCP対称性の破れが起こることが1980年に予言されました。しかし、その実験的検証は、従来の100倍以上の量のB中間子を生産・検出する必要がありました。1994年から1999年にかけて、東北大学-加藤研究機構(KEK)、茨城県つくば市(写真)と米国スタンフォード大学それぞれBファクトリーが建設されました。



Q KEKのBファクトリーについて詳しく教えてください。

KEKのBファクトリーは、長さ3kmのKEKB(ケックビー)加速器と縦向きともおよそ3m、重さ約1400トンのBelle(ベル)検出器(写真)からなっています。KEKBは電子と陽子の電子対生成に、陽電子を3.5ギガ電子ボルトに加速し、正面衝突させることにより、B中間子と反B中間子の対を生み出します。B中間子対を生産する能力は、毎秒約18回と、スタンフォード大学の加速器の1.5倍あり、この種の加速器では、世界一高性能です。B中間子の性質を詳しく調べるにはBelle測定器の役割です。Belleの内側には、粒子の追跡・エネルギーなどを測定する精密なセンサーが約20万チャンネルもぎっしりと詰まっています。約360名の研究者が中心となって設計・製作し、実験を行い、センサーから得られる膨大なデータを解析しています。このデジタルデータは、これまで1ペタバイト(100万ギガバイト)を超えています。



Q 『CP対称性の破れ』とは何ですか？なぜ重要なのですか？

CP対称性とは、粒子の世界の物理法則が反粒子の世界でも同じように成り立つことです。物理学者達は全ての現象でCP対称性が成り立っていると考えていたのですが、1964年、クロニンとフィッチらが、K中間子の実験で、CP対称性がわずかに破れていることを発見し、賞を大賞賞がせました。一方、1930年代の陽電子発見で人類は反粒子の存在を知りませんでした。宇宙は圧倒的に粒子から成っており、どこを見渡しても反粒子で構成された世界は見つかりません。ビッグバン直後の宇宙では同数の粒子と反粒子が生じたと考えられ、これは宇宙創成の大きな謎です。この謎を解く重要な鍵のひとつが、粒子と反粒子のわずかな違い、つまり『CP対称性の破れ』なのです。

Q 小林益川理論とは何ですか？

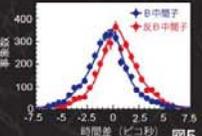
1973年に小林先生と益川先生が、3世代、6種類のクォークが存在すれば、世代を超えたクォークの移り変わりによって、K中間子で発見されたCP対称性の破れが説明できることを提案した理論です。当時知られていたクォークは3種類だけで、さらに新しい3種類のクォークを導入した点で画期的な発想でした。その後、1974年にcクォーク、1977年にbクォーク、1994年にはクォークが発見され6つのクォークの存在が確かめられました。しかし、CP対称性の破れの説明に関しては、bクォークを含むB中間子における実験的検証がどうしても必要でした。

Q どうしてクォークが6種類必要なのですか？

3種類や5種類では、電荷の別クォークの移り変わりが極めて許され、実験事実と異なっています。2世代4種類では、実験の数が足りず、CP対称性を破る現象位位と呼ばれる変数を含めることができません。それで少なくとも6種類という予想に至ったのです。

Q CP対称性の破れはどのように測定したのですか？

KEKB加速器で生成したB中間子は反B中間子と電子ビームの衝突方向に沿って進みながら、bクォークがc、u、dクォークに変化するごとく「崩壊(ほろ)か)します。崩壊するまでの平均的寿命は、約300ピコ秒(1万分の1.5秒)と非常に短いため、それまでには約0.3mmの距離を進みます(図4)。ある特定のB中間子の崩壊パターンを検出した際に、同時に出来た反B中間子が崩壊した時間との差、崩壊位置の差とを測定し、その崩壊の分布をつくります(図5の青丸)。また、B中間子と反B中間子を入れ替えた同様の測定(図5の赤丸)を行って比較します。もし、CP対称性が破れていなければ赤丸と青丸は一致します。しかし、実験結果から両者に違いがあることがわかります(図5)。

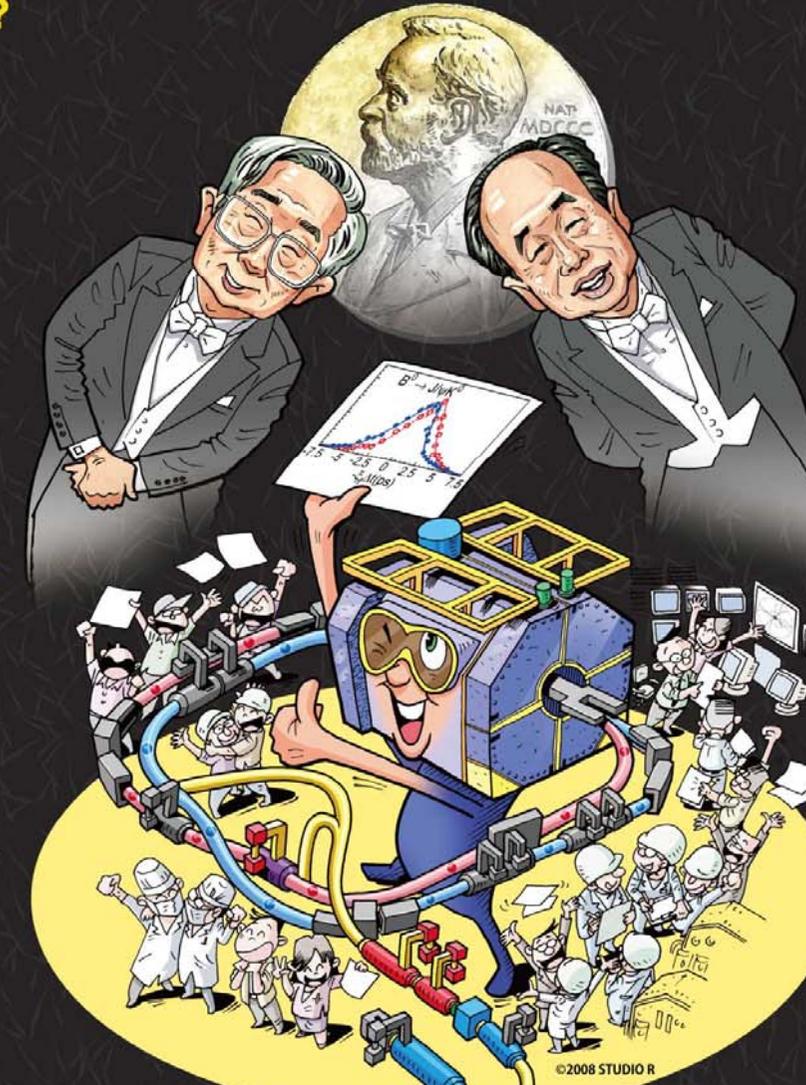


Q 小林益川理論は森羅万象(すべて)を説明できるんですか？

残念ながら、できません。素粒子物理学はまだまだわからないことがたくさんあり、積極的に研究が続けられています。現在日本では、伝統ある理論分野だけでなく実験分野でも、Bファクトリー、スーパーカミオカンデなど、世界第一級の成果を上げています。小林益川理論を突破口として、約137億年前に宇宙が創成された時に起きたとされる、巨大なCP対称性の破れによる物質優勢宇宙の謎を解明がために、スーパーKEKB加速器/スーパーBelle実験計画を推進しています。ぜひ皆さんも参加してください。

Q 大人数の研究グループの中で、個性を發揮するチャンスはありますか？

大きな加速器や実験装置は、まさに人間を誇りに作り出されています。あなたも自分と大人数の小さな研究グループが中心となって、宇宙の謎を解いてみたいのか？、などの疑問を待って取り組むには、実験に参加することとはとても面白いと思います。あなたも個性を發揮する機会がたくさんありますし、自分らしくなれる実験は成功しますね。



Bファクトリーが放った決定打！ 小林益川理論が正解だった！

Bファクトリー実験に参加している研究教育機関

- | | | | | | | | | | |
|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|----------|----------|-------|--------|
| ブドー研究所 | チェンナイ数理解析学 | 千葉大学 | 名古屋大学 | 奈良女子大学 | 台湾 中央大学 | プリンストン大学 | 理化学研究所 | 佐賀大学 | |
| チョンナム大学 | シンチンチ大学 | イーファウチ大学 | 加東 連合大学 | 台湾 成功大学 | 日本薬科大学 | 新潟大学 | 中国科学技術大学 | ソウル大学 | 徳州大学 |
| 輔仁大学 | ゲーセン大学 | キョウガン大学 | パナリカ科学技術学院 | 大阪大学 | 大阪市立大学 | カンクンカン大学 | シドニー大学 | 京都大学 | 東京大学 |
| ハワイ大学 | 広島工業大学 | 北京 薬研 | ハンギョブ大学 | 北京 師範大学 | ヒツパル大学 | タタ研究所 | 東京大学 | 東北大学 | 東北学院大学 |
| モスクワ工科大学 | モスクワ工科大学 | モスクワ工科大学 | モスクワ工科大学 | モスクワ工科大学 | モスクワ工科大学 | 東京大学 | 東京大学 | 東京大学 | 東京大学 |
| カルスルー工科大学 | 神奈川大学 | コリア大学 | カルスルー工科大学 | 神奈川大学 | コリア大学 | 東京大学 | 東京大学 | 東京大学 | 東京大学 |
| クワクワ原子核研究所 | 京都大学 | キョウガン大学 | クワクワ原子核研究所 | 京都大学 | キョウガン大学 | 東京大学 | 東京大学 | 東京大学 | 東京大学 |
| ローザンヌ大学 | マックスプランク研究所 | マックスプランク研究所 | ローザンヌ大学 | マックスプランク研究所 | マックスプランク研究所 | 東京大学 | 東京大学 | 東京大学 | 東京大学 |
| マサチューセッツ工科大学 | メルボルン大学 | メルボルン大学 | マサチューセッツ工科大学 | メルボルン大学 | メルボルン大学 | 東京大学 | 東京大学 | 東京大学 | 東京大学 |

※本文中の「小林益川理論」は、厳密な意味では「小林益川理論を立案するときに、Bファクトリー実験の事実と理論について説明するために、Belle(ベル)実験グループが考案した」という意味です。ずっと持っているチャットと似たように、似たような実験結果を報告しているところもあっています。

大規模国際共同実験ベル

- × KEKB加速器で電子と陽電子を衝突させて、bクォークと反**クォーク**を作り、観測する
- × 世界4大陸、13~5カ国、~55大学研究所の約400名の学生・研究者による共同実験

 **Belle 国際研究チーム**

ブドカー研究所
ブラハ・チャールズ大学
チェンナイ数理科学研究所
千葉大学
ハンヤン国立大学
シンシナチ大学
フーゼン大学
ギーセン大学
ギョンサン国立大学
ハワイ大学
広島工業大学
北京・高能研
モスクワ・IHEP
モスクワ・ITEP
カールスルーエ大学
神奈川大学
グワハティインド工科大学
マドラスインド工科大学
高エネルギー加速器研究機構
コリア大学

クラコウ原子核研
京都大学
キューボック国立大学
ローザヌム大学
マックスプランク研究所
ヨセフスチファン研究所
メルボルン大学
名古屋大学
奈良女子大学
国立中央大学
国立連合大学
国立台湾大学
日本歯科大学
新潟大学
ノバ・ゴリカ 科学技術学校
大阪大学核理研連合
大阪市立大学
パンジャブ大学
北京大学
KISTI

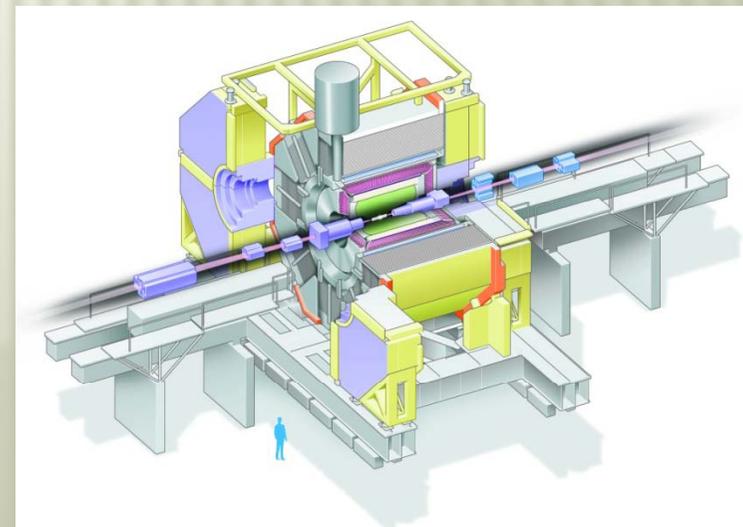
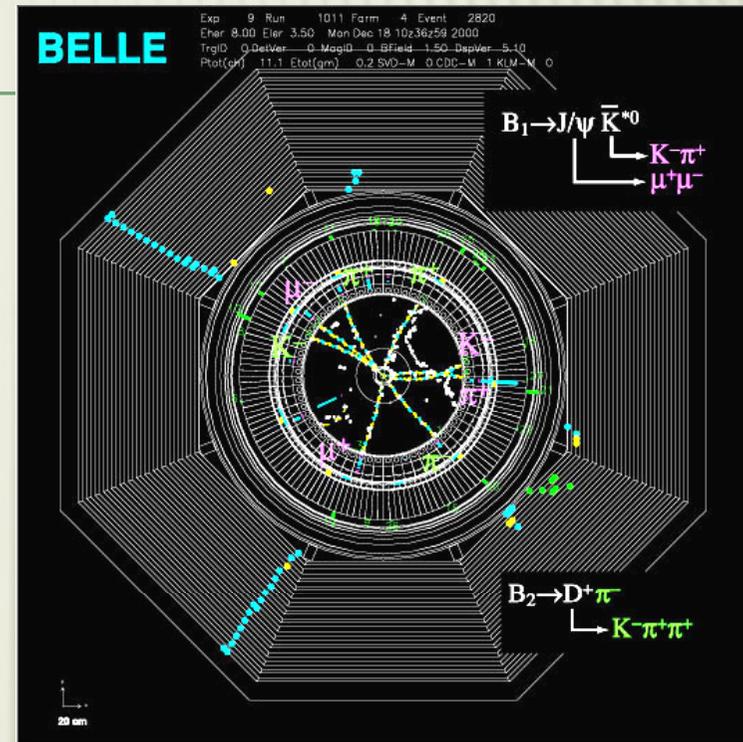
プリンストン大学
理化学研究所連合
佐賀大学
中国科学技術大学
ソウル大学
信州大学
サンキェンガン大学
シドニー大学
タタ研究所
東邦大学
東北大学
東北学院大学
東京大学
首都大学東京
東京農工大学
トリノ・INFN
富山商船高等専門学校
ウェイン州立大学
ウィーン高エネルギー研
バージニア工科大学
延世大学

世界15の国と地域, 61大学・機関, ~400人の研究者
最近一年間に多数新規参加



ベルは巨大なデジカメ

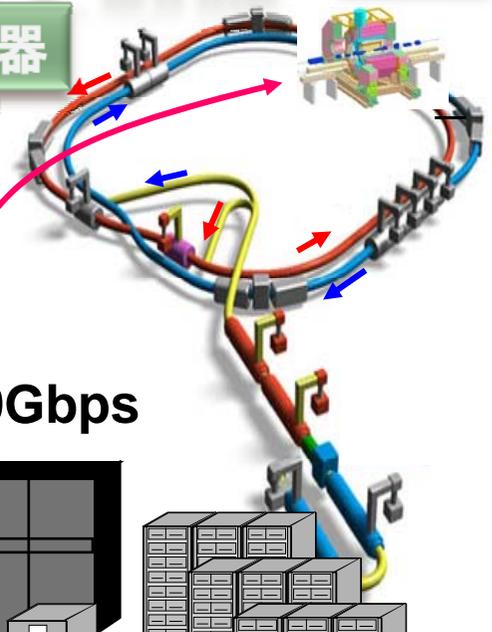
- × 年間2億対の**bクォーク**を生成し観測する
 - × **位置、エネルギー、時間**を測定する最先端のセンサーを20万チャンネル搭載して、信号を取得する
 - × 年間100~200テラバイトのデータを生成、世界中で解析を行う
- + これまでにたまった生データは1ペタバイト以上



SINETはベル・ネットワークの大動脈

ベル

KEKB加速器



ベル VO(Grid)へ
~1TB/day

東北大理学部

400 GB/day
~45 Mbps

NFS

10Gbps

阪大理学部

Belleが一番大変だったのは2000年~2003年頃。SINET/スーパーSINETの専用線に大変お世話になりました。

1TB/day
~100Mbps

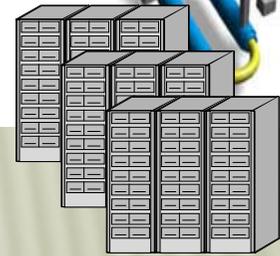
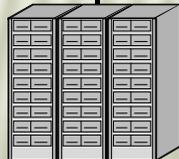
170 GB/day

KEK計算科学センター
1.5PB磁気ディスク
3.5PB 磁気テープ

名大理学部

東大理学部

東工大理学部



SINETは素粒子物理学研究の大動脈

× 神岡宇宙素粒子研究施設

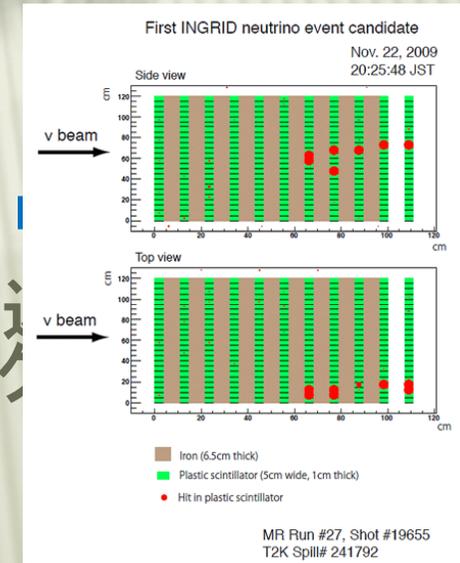
- + スーパーカミオカンデなどのニュートリノ実験
- + 柏の宇宙線研、つくば高エネルギー加速器研究機構、
- + 東海村のJ-PARCなどを結ぶネットワーク
- × T2K実験開始しました！

× 東大・素粒子物理国際センター

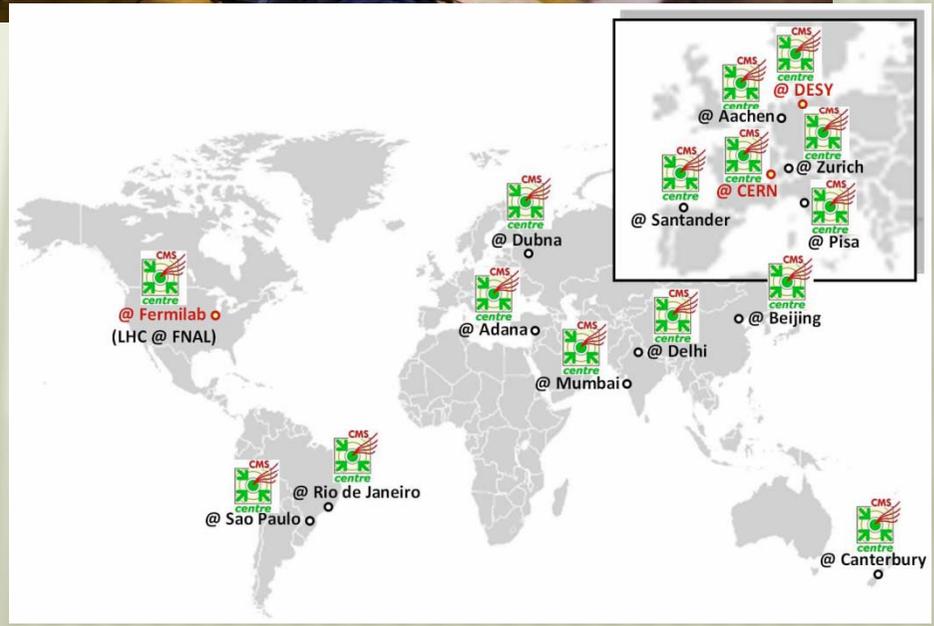
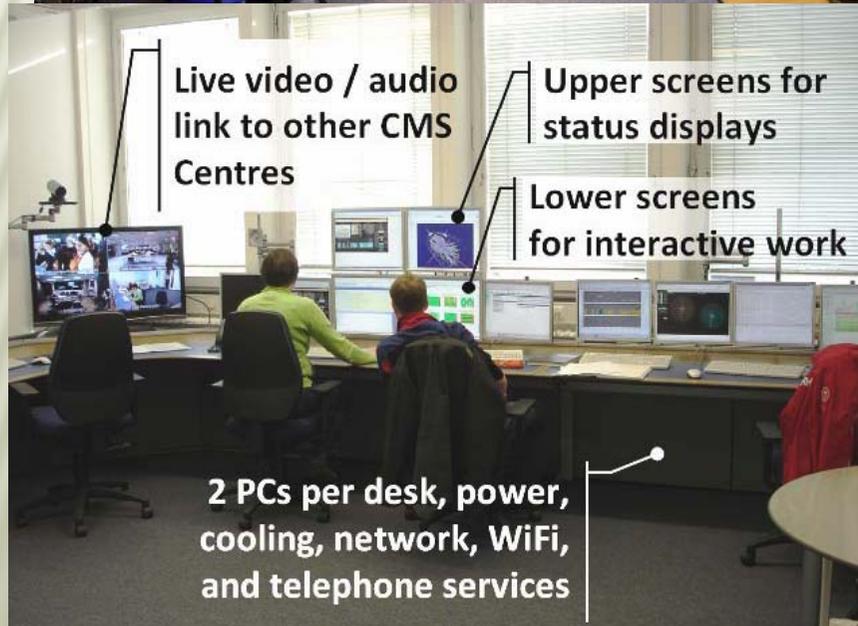
- + LHCアトラス実験（実験開始しました！）
- × フランス（TIER1）との大量のデータのやり取り
- × KEK、名古屋大、阪大、神戸大などの日本グループの解析をサポート

× 筑波大・計算科学研究センター

- + 強い力のシミュレーション
- × スパコンどうしをSINETで密結合（京大・阪大・広島大）

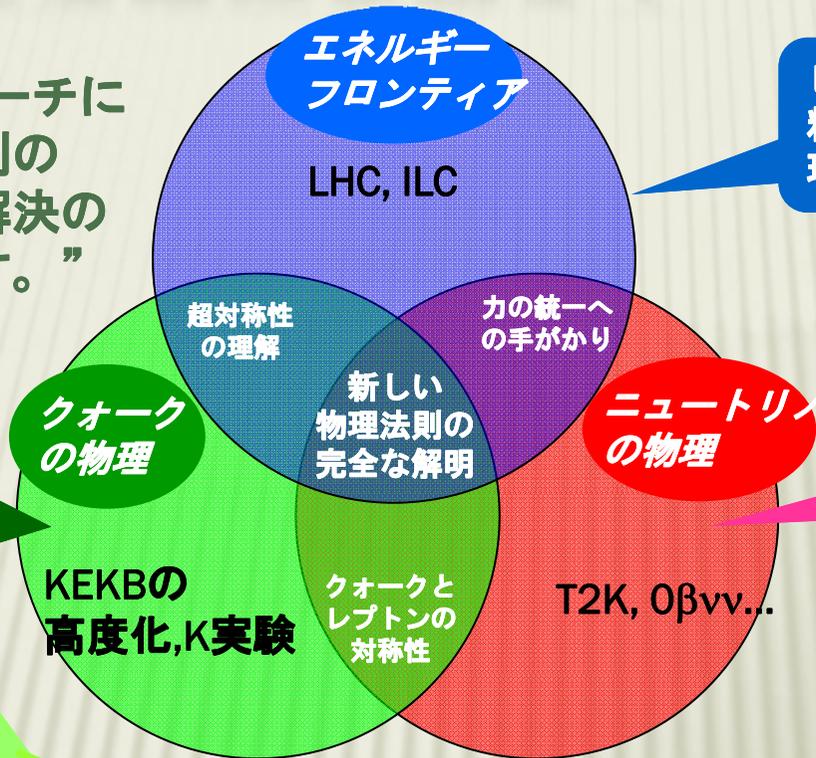


大学からLHC実験をコントロール?



素粒子の標準理論を越えて

“多方向からのアプローチによって新しい物理法則の完全解明を図り、未解決の宇宙の謎を解き明かす。”



ヒッグス粒子, 超対称性粒子, 時空構造の新しい理解...

ニュートリノの質量と混合, レプトン数の非保存...

CP非対称性, 左右の対称性, 新物理(超対称性)でのクォーク混合, 荷電ヒッグスの相互作用, レプトン数の非保存...

ニュートリノの謎の解明

未解決の宇宙の大きな謎

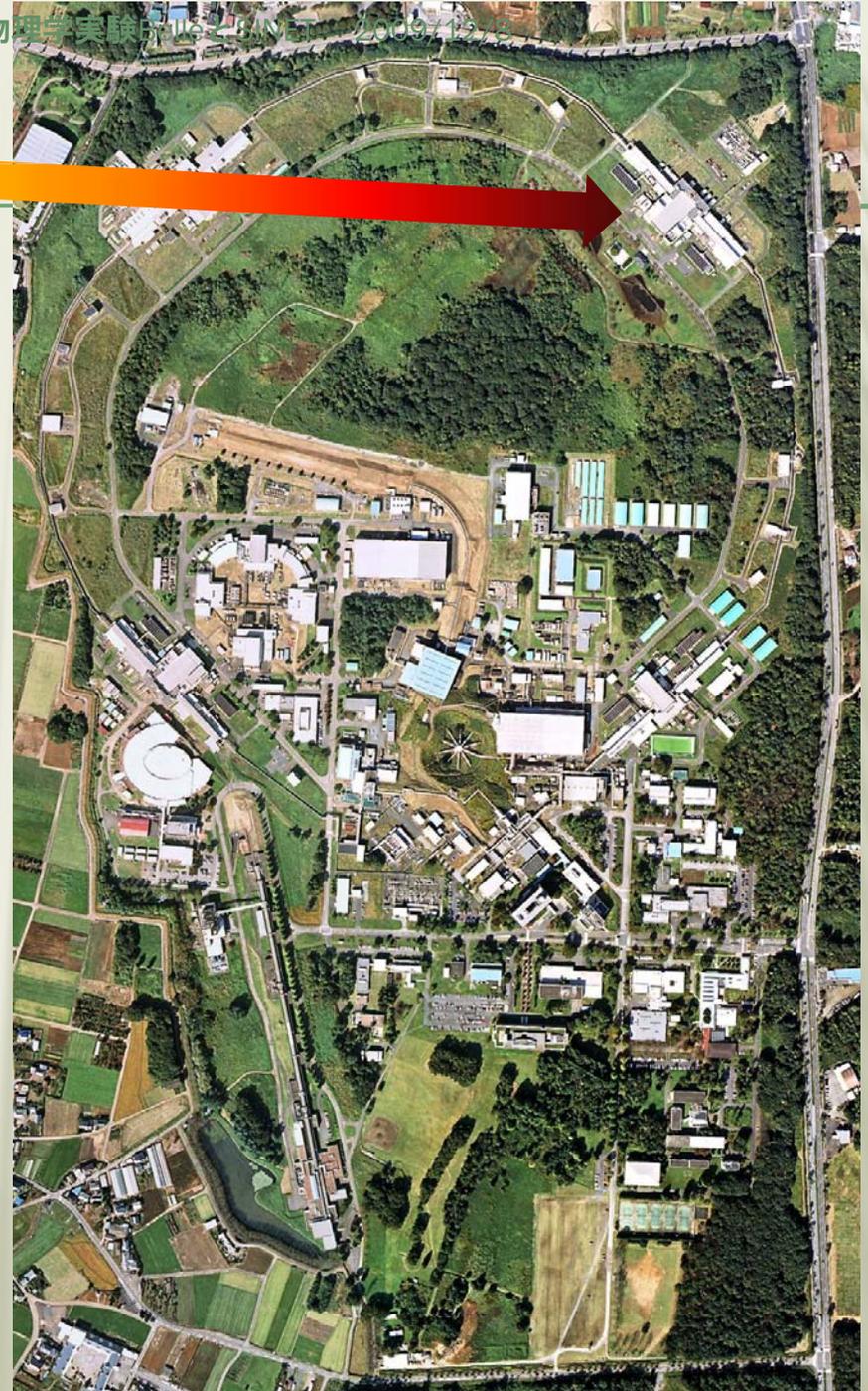
Unsolved Mysteries
Driven by new puzzles in our understanding of the physical world, particle physicists are following paths to new wonders and startling discoveries. Experiments may even find extra dimensions of space, mini-black holes, and/or evidence of string theory.

<p>Universe Accelerating?</p> <p>The expansion of the universe appears to be accelerating. Is this due to Einstein's Cosmological Constant? If not, will experiments reveal a new force of nature or even extra dimensions of space?</p> <p>加速する宇宙膨張</p>	<p>Why No Antimatter?</p> <p>Matter and antimatter were created in the Big Bang. Why do we now see only matter except for the tiny amounts of antimatter that we make in the lab and observe in cosmic rays?</p> <p>消えた反物質</p>	<p>Dark Matter?</p> <p>Invisible forms of matter make up much of the mass observed in galaxies and clusters of galaxies. Does this dark matter consist of new types of particles that interact very weakly with ordinary matter?</p> <p>暗黒物質の正体</p>	<p>Origin of Mass?</p> <p>In the Standard Model, for fundamental particles to have masses, there must exist a particle called the Higgs boson. Will it be discovered soon? Is supersymmetry theory correct in predicting it?</p> <p>質量の起源</p>
--	--	---	---

Particle Adventure より転載

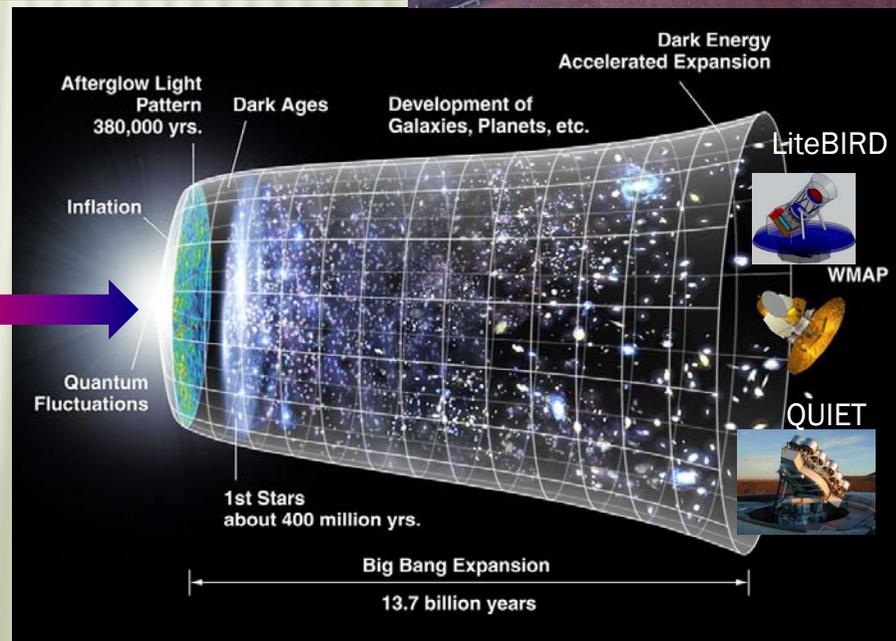
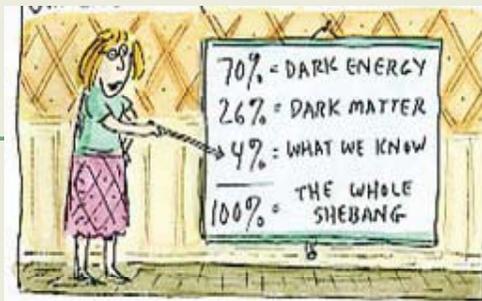
ベルII実験計画

- × 現在のベル・KEKB加速器の性能を40倍に高め、50倍のデータ量を収集
- × 新しい物理法則の証拠を発見する
- × 世界に唯一つの実験であり、世界中の研究者が参加
- × データ量は50~100倍に
+ SINET4によるデータ転送
(クラウドへ?)



宇宙は実験室

- × すばる望遠鏡（ハワイマウナケア山頂）
 - + Hyper Suprime-Camによるダークエネルギー観測
- × チリ・アタカマ山頂や衛星実験による宇宙マイクロ波背景放射Bモード偏光の観測
 - + インフレーションに起因する原始重力波の観測
- × 大量のデータを解析
 - + 世界に一つの測定器から世界中の研究者の机上へ 超高速ネットワークの重要性



NASA/WMAP science team

まとめ

- × 素粒子物理学（実験）は宇宙や人類がどこから来てどこへ行くのかを研究する基礎科学
- × 最先端のセンサーを使用して大量のデータを生成し、世界中の研究者が高度な解析を行い、本質に迫る理論を実証（**あるいは新発見！**）
- × センサーとコンピュータと研究者をつなぐ世界規模（国内から宇宙まで）の高速ネットワーク基盤が非常に重要（**特に競争中には...**）
- × 科学技術予算に関して**文科省ではパブコメを求めています**。ぜひご意見を（12/15まで）！

http://www.mext.go.jp/a_menu/kaikei/sassin/1286925.htm