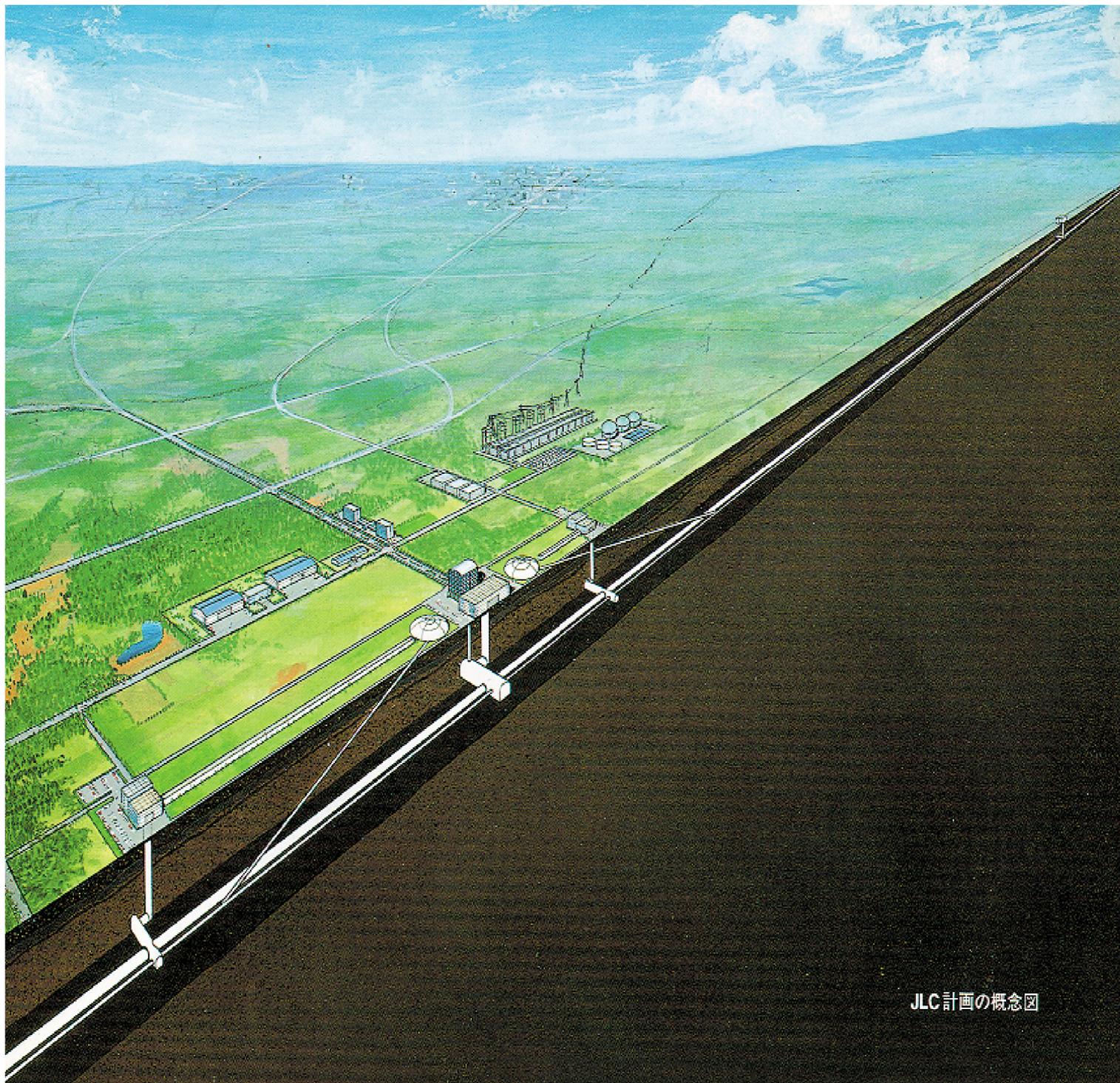


物質の根源、宇宙創成の瞬間に迫る
電子・陽電子リニアコライダー計画
(JLC Project)

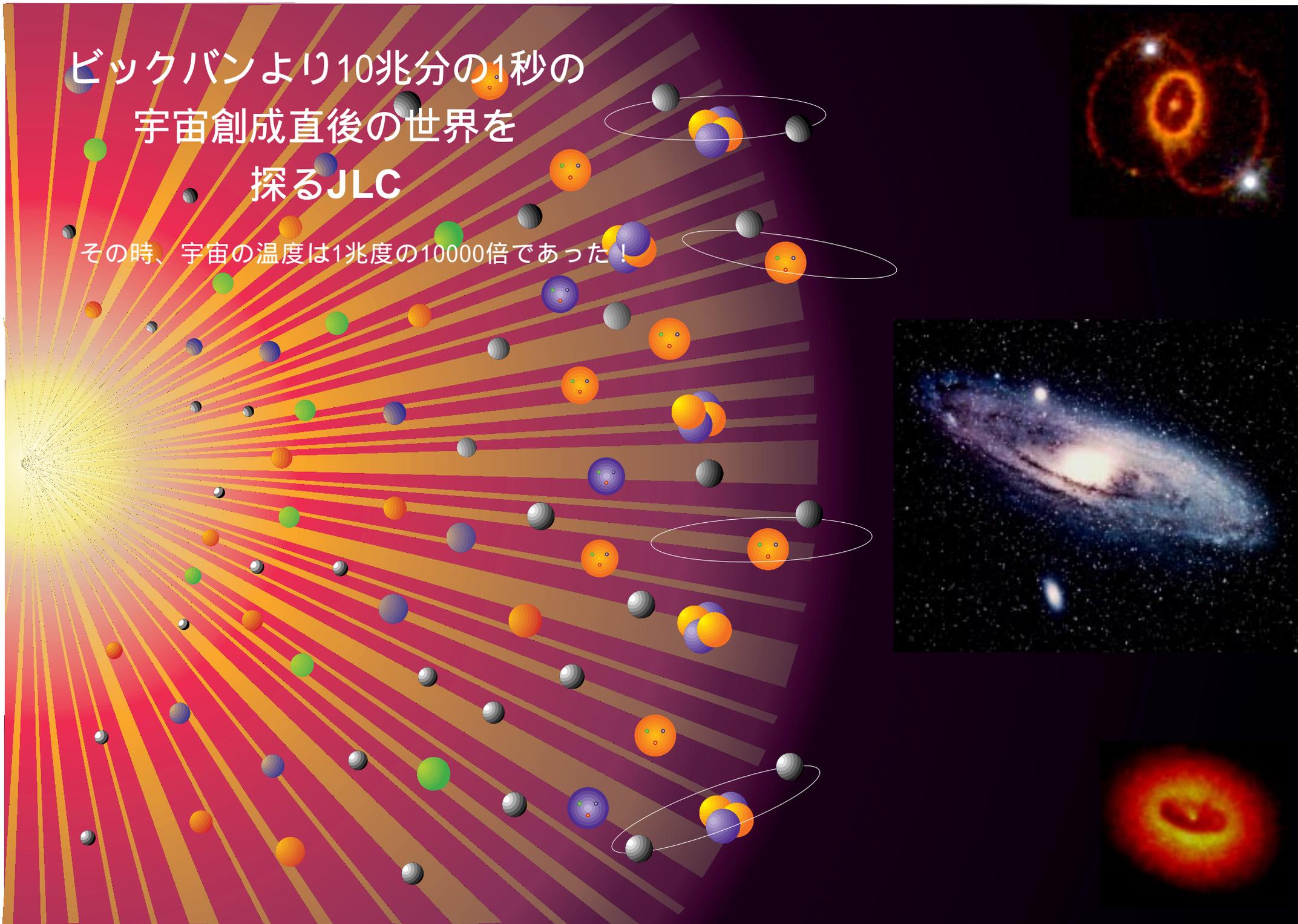


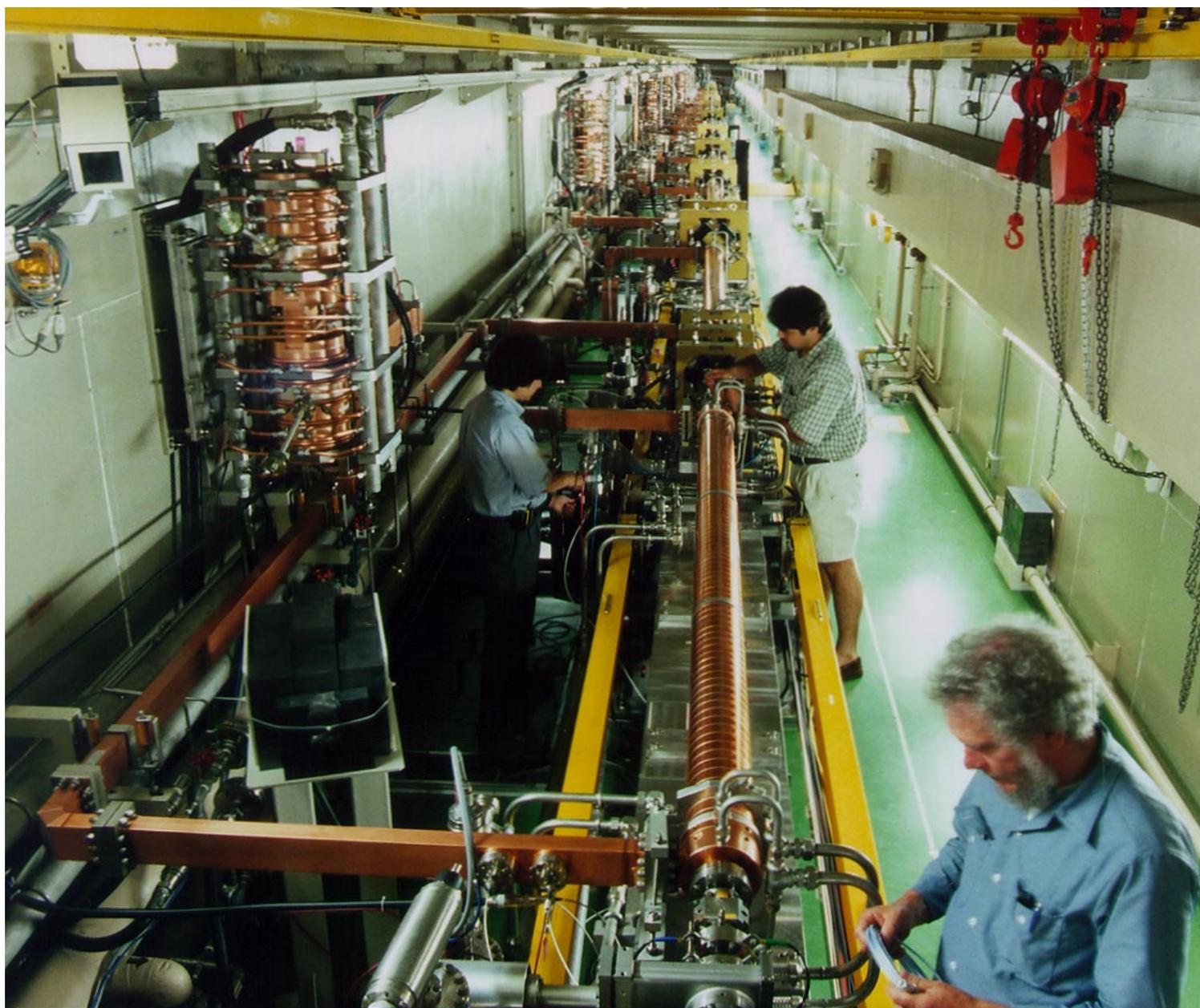
JLC計画の概念図

KEK 文部科学省・高エネルギー加速器研究機構

ビッグバンより10兆分の1秒の 宇宙創成直後の世界を 探るJLC

その時、宇宙の温度は1兆度の10000倍であった！





ATFリニアック：高エネルギー加速器研究機構（KEK）、先端加速器試験装置（ATF）のダンピングリングへの入射用線形加速器（リニアック）。全長70メートル（m）で9本の85メガワット（MW）クライストロンにより1.54ギガ電子ボルト（GeV）まで電子ビームを加速します。1995年秋より稼働し、Sバンド（2,856メガヘルツ（MHz）、波長約10センチメートル（cm））による高周波加速では、1メートルあたり平均30メガ電子ボルト（MeV/m）という世界最大の加速勾配を持ちます。JLCの主要部分（主リニアック部分）も、このような線形加速器が一直線に並んだものになります。

ギガ、メガ、電子ボルトの単位：ギガ（G）は10億の単位、メガ（M）は100万の単位を表します。また、1電子ボルト（eV）は1個の電子を1ボルトの電圧で加速したときに得られるエネルギーの単位です。アインシュタインのエネルギーと質量の等価則によって、光速の2乗で割ったeV単位（ eV/c^2 ）は、重さ（質量）の単位として用いられます。素粒子物理学（高エネルギー物理学）で用いられる光速を1とする自然単位系では、エネルギーと質量は同じeV単位で表されます。

はじめに

JLC計画構想は、素粒子物理の革新的な展開を狙ったものです。宇宙創成時の素粒子の世界を見通すことへの期待を担っています。

私たちの目の前にあるもの、地球、太陽系、銀河そして宇宙は一体どのようなものから構成され、どのようにして作り上げられたのでしょうか。私たちはすべての物質が分子や原子からできていることを知っています。私たちの好奇心は、さらに小さな原子核、核子の世界へと向かいました。20世紀に入り、加速器という高エネルギーを得る手段を手に入れてから、より微細な世界がにわかに私たちの眼前に現れてきました。今、私たちは極微な素粒子の世界にたどり着いています。このようにして得られた知識は私たちの自然観を深めるとともに、現代の科学・技術の基礎にもなっています。

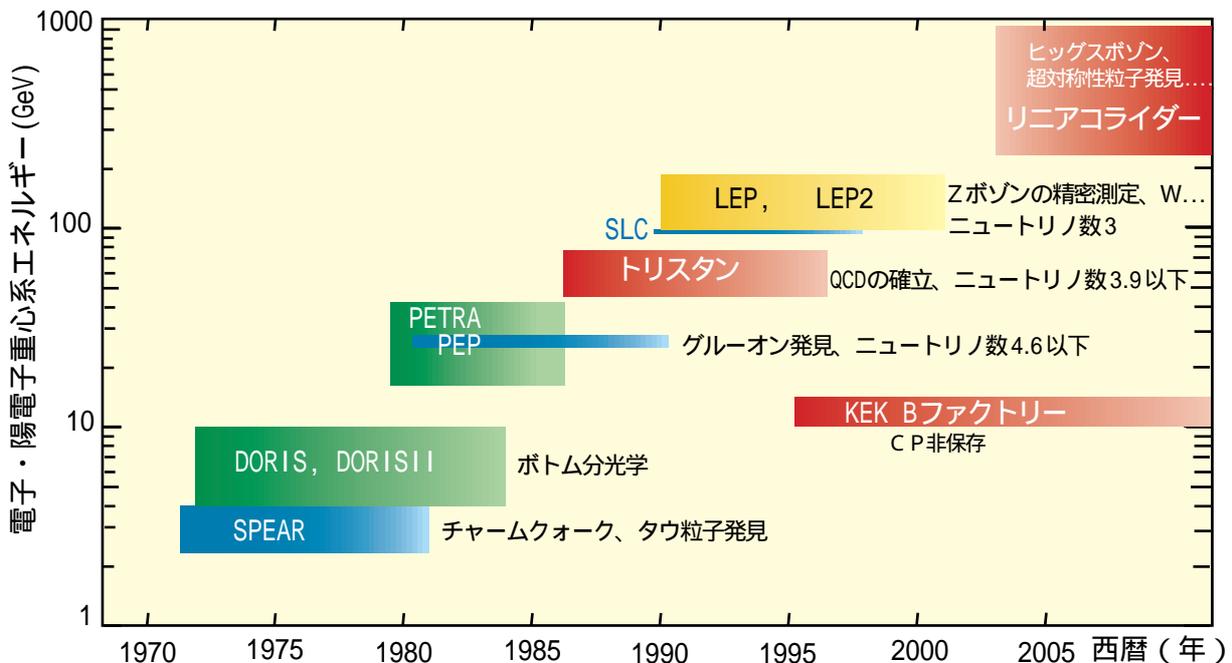
現在、数百ギガ電子ボルト（GeV）領域の素粒子世界の研究に大きな期待がよせられています。この領域では、すべての素粒子の重さ（質量）の起源となっているヒッグス粒子、そして力の大統一の鍵となっている超対称性粒子の発見が確実視されています。また、それらの素粒子反応の詳細な研究により、宇宙創成時の超高エネルギーの世界を見通すことへの期待が急速に広がっています。

電子・陽電子リニアコライダー計画（通称JLC計画）は、日本の高エネルギー研究者の総意にもとづく次期基幹計画として策定されました。ニュートリノ数の制限、強い力を伝達する粒子であるグルーオンの自己結合の発見など多大

な成果を上げたトリスタン計画、宇宙が反物質ではなく物質で満たされている謎（CP非保存）を解くであろうBファクトリー計画に続くものです。第1期として重心系エネルギー500GeVまでの加速器の早期実現を目指しています。このJLC計画は素粒子世界の数々の謎を解明すものと期待されています。

ヨーロッパでは、同様な目的を持った計画がすでに始められています。これはLHC計画と呼ばれ、陽子・陽子衝突のハドロンコライダーです。JLCのような電子・陽電子衝突のレプトンコライダーと、LHCのようなハドロンコライダーは、高エネルギー素粒子反応を研究する上で、ともなくてはならないものです。リニアコライダーの開発研究はKEK（日本）を始めとして、BINP（ロシア）、DESY（ドイツ）、CERN（ヨーロッパ）、SLAC（アメリカ合衆国）など世界中の研究所で行われています。ヨーロッパ諸国がLHCを担い、日本が主導的にレプトンコライダー計画を推進することは世界的に重要な役割分担を果たすことになります。

最近、中国、韓国、台湾を始めとするアジア地域では、加速器技術が飛躍的に向上しています。そして、加速器を利用した基礎科学のアジア地域センターともなるJLCの実現に、大きな期待を抱いています。



電子・陽電子コライダーの歴史：1970年初頭、電子・陽電子コライダー技術が確立されるやいなや、第4番目のクォークのチャーム、第3番目の荷電レプトンのタウ粒子が発見されました。ボトムクォークが陽子加速器で発見されると、すぐに、その共鳴粒子の分光学的研究が行われました。続いて、グルーオンが発見され、トリスタン、LEP実験等によって、強い力（QCD）、電磁力、弱い力の標準理論が確立していきました。リニアコライダーでは、これら3つの力の大統一理論の鍵を握るヒッグスボソン、超対称性粒子の発見を通じて、より深い物質の根源、宇宙創成の瞬間に迫ります。

ハドロンとレプトン：陽子などのように、原子核を作り上げている『強い力』を及ぼしあう一群の粒子を総称してハドロンと呼びます。ハドロンはクォークが集まってできた複合粒子です。これに反して、『強い力』を全く感じない一群の物質粒子をレプトンと呼びます。電子は電荷を持ったレプトンの中で最も軽く、ニュートリノは電子より遥かに軽く電荷を持たない中性のレプトンです。

物質の根源を求めて、素粒子とは何か？

千差万別の物質は、百種類ほどの原子からできています。原子は物質を構成する最小の要素という意味で名付けられました。しかし、原子は原子核と電子から、原子核も陽子と中性子から構成されています。このような物質の階層構造はどこまで続くのでしょうか。それ以上分割できない点状粒子の素粒子とは一体どのようなものなのでしょうか。

素粒子発見の幕開け、19世紀末

物質の基本的な構造や、互いに及ぼしあう力の根源を解き明かそうとする高エネルギー物理の歴史は、素粒子の発見の歴史と重ね合わせることができます。その発端はちょうど100年ほど前にさかのぼります。1897年、J.J.トムソンは真空管を通る陰極線が電子であることを発見しました。この発見が素粒子発見の第一号です。

当時、物理学者の興味の対象でしかなかった電子が、100年後、エレクトロニクス技術の基礎となり、テレビ、パーソナルコンピュータを始めとする今日の高度情報化社会を生み出しました。特に、テレビのブラウン管は陰極線をそのまま利用しています。

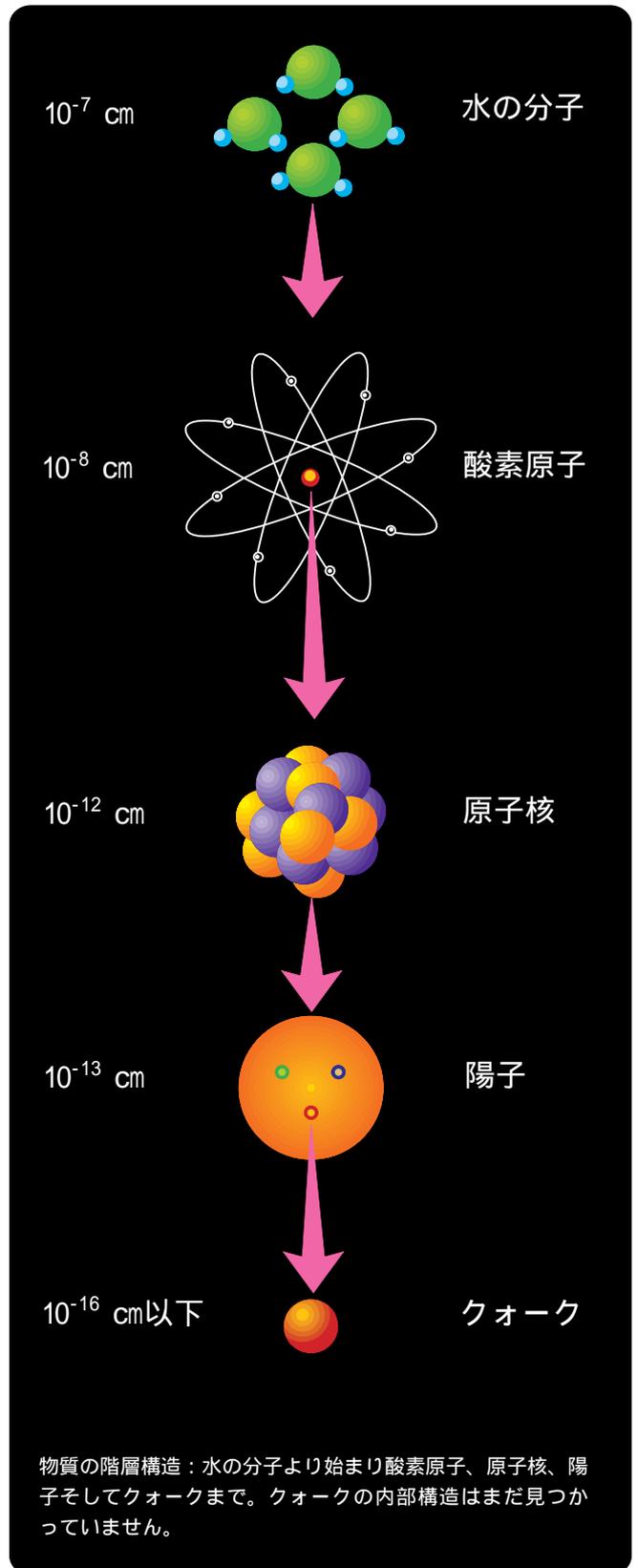
素粒子とは？

一般に、物質を構成する最も基本的な粒子を素粒子と呼んでいます。私たちの体、動物、魚、木、花などの地球上のものは、1億分の1センチメートル程度の大きさの原子からできています。また、原子はその大きさの1万分の1の原子核と、その回りに引き付けられた電子よりできています。さらに、原子核は幾つかの陽子と中性子が結び付いたものです。

原子核の内部構成が判ったばかりの頃は、電子と陽子と中性子が素粒子だと考えられていました。しかし、1930年代からは宇宙線の中に、そして1950年代からは高エネルギー加速器を用いて、次々に新粒子が見つかりました。どれも自然界に安定に存在するものではなく、寿命の違いはあっても、他の粒子へと崩壊してしまうものでした。なかでも、陽子/中性子とその仲間やパイ中間子とその仲間といった、互いに電磁気力の100倍もの強い力を及ぼし合う粒子が非常に多く、まとめてハドロン族と呼ばれました。一方、電子に対する反電子（陽電子）だけではなく、陽子に対する反陽子のように、どの粒子にも互いに出会うと消滅してしまう反粒子が存在することがはっきりしたのもこの頃でした。

「粒子の動物園」とまで言われたこの状況が変わり始めたのは、1960年代後半でした。粒子の分類に基づいた理論的な推測だけではなく、実験によってもハドロンは、もっと基本的な粒子であるクォークからできた複合粒子だと分かったのです。内部でのクォークの配置や組み合わせによって、さまざまな複合粒子状態が出現したのです。素粒子という名前は、それ以上分割できない、内部に構造を持たない点状粒子をイメージしたものですから、陽子も中性子も厳密な意味での素粒子ではありません。

現在のところ、物質の素粒子は、ハドロンを作るクォーク、そして、電子、ニュートリノ、ミューオンなど強い力を感じないレプトンです。



大きな（小さな）数の表示方法：1億という数は1のあとに0が8つも並び100,000,000で表示することができます。もっと大きな数になるとさらに多くの0が並びその表記が煩雑になります。そこで、1億は並んだ0の数の8を10の右肩の上に置き、10⁸（10の8乗）と表します。また、その分数は右肩の数の前にマイナス符号（-）を付けます。したがって、1億分の1は10⁻⁸（10のマイナス8乗）と表します。

秩序あるクォーク・レプトンの世界

本当の素粒子の世界は複雑なものではないはずです。実際、物質の素粒子と考えられているクォーク族とレプトン族は、複合粒子である兆候はまったくなく、しかも非常に簡単に整理されています。この高度な秩序（対称性）は、その背後にもっと基本的な物理法則があることを、私達に教えようとしています。

クォークとは？

1960年代、数百種類にも上るハドロンを分類するよい方法が提案されました。陽子、中性子などバリオン族はクォークと呼ばれる小さな素粒子3個、また、パイ中間子など中間子族は一对のクォークと反クォークからできていると考えるアイデアでした。

当時、3種類のクォークがあると考えられました。たった3つの、しかも『半端な』電荷を持つクォークで、数百のハドロンを分類し、その性質を予測できることは、革命的な進展でした。3つのクォークはアップ、ダウン、ストレンジと名付けられました。電子がその電荷を通じて電磁気力を感じるように、クォークは『赤、青、緑』の3つのカラー荷を通じて強い力を感じます。

このクォークモデルの提唱以来、今日まで、地球上の物質や宇宙線の中などで数多くのクォーク探索が行われましたが、裸のクォーク（半端な電荷の粒子）は観測されませんでした。これは強い力の持つ特異な性質によるためと考えられています。

クォークは、高エネルギーのレプトンで陽子を激しく叩く（非弾性散乱）実験で分かったように、陽子の中に点状粒子として確かに存在するのです。

3世代のクォーク、レプトン

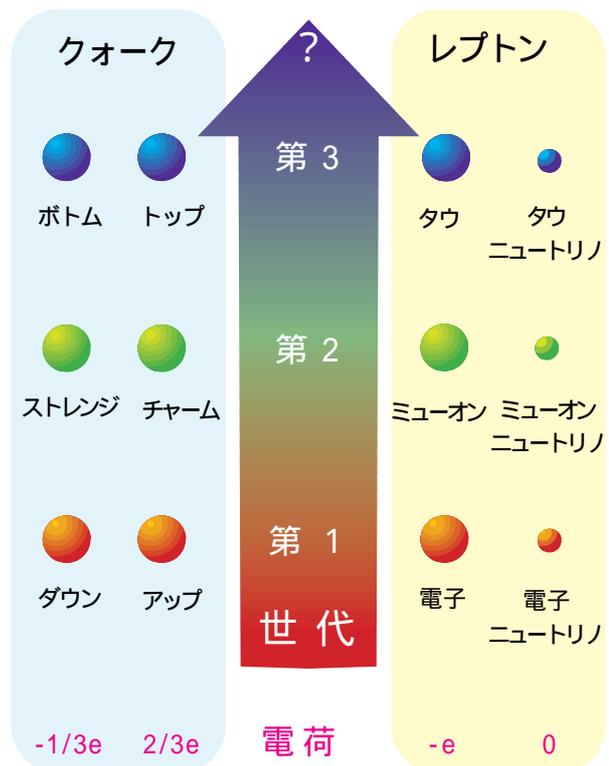
1970年代になると、電子・陽電子コライダーによる高エネルギー実験が精力的に行われるようになりました。これらのコライダーでは電子と陽電子が消滅し、クォークと反クォークが対生成されることが観測されました。

確かに、低いエネルギーでは、カラー荷を持ち半端な電荷を持つアップ、ダウン、ストレンジの3種類のクォークが対生成されていました。電子・陽電子の衝突エネルギーを高くしていくと、さらに、2種類のクォークが次々と発見されました。第4番目のクォークはチャーム、第5番目はボトムと名付けられました。チャーム発見とほぼ同時期に、電子、ミュオンに続く電荷を持つ第3番目のレプトンも発見され、タウと名付けられました。

5つのクォークの内、アップとチャームは電子電荷（ $-e$ ）の3分の2の正電荷（ $2/3e$ ）を持ち、残りのダウン、ストレンジ、ボトムクォークは電子電荷の3分の1の負電荷（ $-1/3e$ ）を持っていることも確かめられました。

さらに仲間分けをしてみると、6つのクォークが3つの対（ $2/3e$ 電荷、 $-1/3e$ 電荷）を形成することが強く示唆されました。このような6クォークモデルはチャームクォーク発見の前年、1973年、小林、益川によって提唱されていました。ボトムクォークと対をなすと期待されていた第6番目のトップクォークは、予想通りに、1995年、陽子・反陽子コライダーで発見されました。

また、レプトンも電荷を持たない3つのニュートリノを加えた6種類あり、クォークと同様に3世代を形成しています。これら世代は質量以外同じ性質をもち、どうして3つの世代を必要とするのか、また、このようなクォーク・レプトンの対称性はどのような法則に基づくのかなど謎に包まれています。



クォーク、レプトンの対称性：ともに電荷が1単位（ e ）だけ違う2つの素粒子から成る3つの世代があります。世代内の2つの素粒子は弱い力で互いに転換し合うことができます。これら3つの世代は質量以外同一の性質を持ちます。一般に、世代が進むにしたがって質量が大きくなり、その生成に高いエネルギーを必要とします。どうして3世代が存在し、また、クォークとレプトンにどのような関係があるのかは、素粒子物理の大きなテーマの一つになっています。

素粒子は宇宙そのもの！



電荷を持つ素粒子の中で最も軽い電子にどんどん近づいて行くとどのようなことが起こるのでしょうか。図中の一番輝いているところが電子の中心で、ひじょうに強い電荷から光子が放射されています。電子中心に向かうにしたがって電場はますます強くなり、『量子論的ゆらぎ』が引き起こされます。その結果、あらゆる素粒子が対で生成され、また、直ちに消滅しています。このように電子近傍では素粒子の対生成・消滅が絶えず繰り返されるひじょうにダイナミックな世界です。これは、まるで宇宙創成直後の世界のような世界です。JLCはこの素粒子の世界（宇宙創成間近）に到達できる十分な高エネルギーを持つ電子・陽電子コライダーです。

自然界の4つの力

19世紀末の最初の素粒子発見以来、素粒子の世界を探ることにより、自然は複雑であっても、それを支配しているのがたった4種の力であることが分かりました。これは20世紀の科学の生み出した偉大な成果の一つです。

重力

私たちにとって最も馴染みのある力は重力です。すべての素粒子に引力（万有引力）として働きます。他の力と比べると非常に小さく、通常、素粒子の世界では無視することができます。重力は遮られることなく無限遠まで働くため、マクロの世界を支配しています。地球、太陽、銀河系などの天体の運行を司り、巨大な宇宙の構造を作り出しています。また、ビッグバンによる宇宙創成直後の超々高エネルギーの素粒子の世界では、他の力とともに重要になってきます。

電磁気力

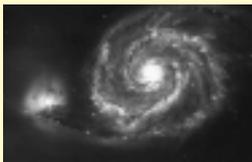
次に馴染み深い力は電磁気力です。電荷や磁気能率を持つすべての素粒子に働きます。電磁気力は電気力と磁気力の2つの力として私たちの身近にあります。それらが同一のものであることは19世紀には、すでに、わかっていました。この電磁気力は電子と原子核から原子を作り、また、幾つかの原子から分子を作っています。粒子加速器の加速原理ともなる力で、放射光も作り出しています。また、エレクトロニクスを始めとして、現代社会では最も有用な力となっています。

弱い力

弱い力はひじょうな短距離間でのみ働きます。通常、電磁気力よりもはるかに弱いものです。すべてのクォーク、レプトンに働きます。弱い力は原子核を放射崩壊させます。また、中性子、パイ中間子などの粒子も崩壊させます。

強い力

カラー荷を持つ素粒子に働きます。電磁気力の100倍程の大きさを持つ最も強い力です。そのため、陽子同士の間働く電気的な斥力に打ち勝って、中性子とともに原子核を作ります。ただし、この力は陽子、中性子内部のカラー荷を感じるくらい互いに十分に重なり合ってやっと働く短距離力です。それは、陽子などが赤、青、緑の3種類の『カラー(色)』をそれぞれ持つ3つのクォークの作る複合粒子で、全体として白色となりカラー荷を持っていないためです。また、クォークと反クォークから成るパイ中間子などは、そのクォークのカラー荷が反クォークの反カラー荷と打ち消し合い白色となっています。このように直接観測される粒子はすべて、裸のカラー荷を持っていません。

	電弱力			
力の種類	強い力	電磁気力	弱い力	重力
力の伝達粒子	グルーオン	光子	W,Zボゾン	重力子
力の大きさの目安	1	0.01	10^{-5}	10^{-40}
	原子核 ハドロン 核融合 太陽エネルギー	分子、原子 エレクトロニクス 放射光 オーロラ	中性子崩壊 原子核崩壊 ニュートリノ 地熱	万有引力 銀河系 ブラックホール 渦巻き星雲
				

自然界の4つの力：強い力は、陽子と中性子をもとに原子核を形成します。また、太陽エネルギーを作り出して、地球上の全生物のエネルギーの源となっています。電磁気力は原子、分子を作り、また、虹、雷、オーロラなどの自然現象を起こします。弱い力は不安定な原子核を崩壊させますが、地熱はまさに地球内部の物質の放射線崩壊によって作り出されたと考えられています。重力は渦巻き星雲（M51）などの天体を形作ります。強い力から重力まで、力の大きさは40桁も違います。現在、素粒子の世界では重力は無視できますが、宇宙創成時にはこれら4つの力は同じ大きさであったと考えられています。

質量起源の謎を解く

トップクォークは、なぜアップやダウンクォークより約100,000倍も重いのでしょうか。また、素粒子の三世代間の違いは、その重さ（質量）以外ないように見えます。もしすべての素粒子が質量を持っていないとしたら、それらの間にある対称性（同一性）は完全なものとなるでしょう。質量起源と対称性には何か関係がありそうです。

標準理論とは？

6つのクォークと6つのレプトンに見えている秩序と、その粒子間に働く一見全く違う4つの力の中に、何か深いところでのつながりを見出そうというのが、高エネルギー物理学の大きな目標です。

その目標に向かっての大きな一歩となったのは、1960年代に提唱された、電磁気力と弱い力を『統一する』電弱理論です。量子論的に見ると、電磁気力は2つの荷電粒子の間で、光子をお手玉のように交換し及ぼしあう力です。同じように、弱い力は弱電荷を持つ素粒子間に働く交換力として考えることができます。

この電弱理論は、光子の他に3つの W^+ 、 W^- 、 Z^0 ボソンを、力を伝達する粒子として予言しました。また、弱い力が非常に短距離しか及ばないのは、これらボソンが重い質量を持つためと説明しました。1983年、これらのボソンは予言通りCERN（ヨーロッパ素粒子研究所）で発見されました。また、強い力は、カラー荷を持つ素粒子間での、グルーオンと呼ばれるゼロ質量の粒子の交換によります。グルーオンもカラー荷を持ち8種類あります。そのため、強い力の理論は量子色力学（QCD）と呼ばれます。力を伝達する粒子も素粒子であり、ゲージボソンと呼ばれています。

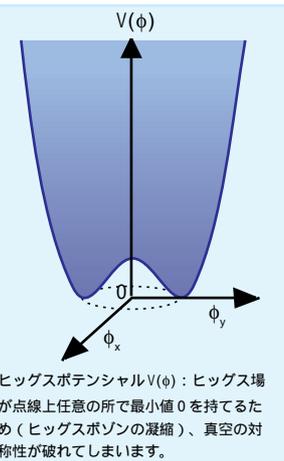
標準理論とは、電弱理論と量子色力学の2つを指し、素粒子間に働く重力以外の3つの力の理論です。力の強さはそれぞれの力に特有な3つの結合定数の大きさで決まっています。また、素粒子がどのような電荷、弱電荷、カラー荷を持つかは、それらの間にある対称性にに基づきます。

質量起源の謎

粒子の質量とは、その粒子が存在するのに必要最小限の、つまり静止した時に持つエネルギー量です。光子など重さのない（質量0の）素粒子は静止することができず、絶えず光速で進行しています。また、同じ大きさの力を受けたとき、質量の小さな素粒子ほどより大きな加速度を得てしまいます。

標準理論によれば、電磁気力と弱い力はひじょうな高エネルギーで、同一の力として統一されます。そこでは、電弱理論の『完全な』対称性があり、ゲージボソン、クォーク、レプトンは質量を持っていません。エネルギーが低くなるとともに、その対称性は破れたと考えられています。また、この対称性の破れによって、弱い力のゲージボソン、クォーク、レプトンは質量を持ったと考えられています。

対称性の破れはどのようにして引き起こされるのでしょうか。標準理論はこの張本人として、ヒッグスボソンと呼ばれる素粒子の存在を予言しています。高エネルギーの統一された世界の真空は『蒸発した』ヒッグスボソンで満たされています。低エネルギーになると、真空にヒッグスボソンが凝縮し始めます。これは、あたかも、温度が下がり始めると水蒸気が水になり始めることとよく似ています。また、真空の相転移が起こったとも考えることができます。この相転移によって真空の『なめらかさ』すなわち対称性が失われてしまいました。弱い力のゲージボソンはこの凝縮したヒッグスボソンと弱い力で結合し、質量を獲得します。クォーク、レプトンは湯川力と呼ばれる未知の力でヒッグスボソンと結合し、質量を獲得します。



この凝縮したヒッグスボソンと弱い力で結合し、質量を獲得します。クォーク、レプトンは湯川力と呼ばれる未知の力でヒッグスボソンと結合し、質量を獲得します。

標準理論を担う素粒子は、新たに、ヒッグスボソンを加えてすべて出そろいました。現在、未発見のものはヒッグスボソンのみです。このように、質量起源の謎解きには、ヒッグスボソンの発見が鍵となります。

標準理論の数学的説明

標準理論は空間各点での量子力学的場の位相の変換（ゲージ変換）に対して、相互作用（力の物理）が不変であるように定式化されます。そのためには、ゲージボソンと呼ばれる力を伝達する素粒子が必然的に現れます。光子、 W^+ 、 W^- 、 Z^0 ボソン、8つのグルーオンはこのゲージボソンです。ゲージ変換に対する不変性に基づく理論をゲージ理論と呼びます。一般に、ゲージボソンを交換することで、素粒子は『別の素粒子』に変換されます。このゲージ変換はこれら素粒子の間にある対称性によって決まります。この隠された対称性を発見したことが標準理論の成功の鍵でした。この対称性は数学では群として表すことができます。電弱理論には、電荷（ハイパーチャージ）保存を導く $U(1)$ 対称性、そして、1世代を構成する2つの素粒子、厳密に言うと、それら2つの素粒子の左巻き成分の間の $SU(2)$ 対称性があります。それは $U(1) \times SU(2)$ 対称性と呼ばれます。強い力の理論には、3種類のカラー荷を持つクォーク間の $SU(3)$ 対称性があります。

ボソンとフェルミオン：素粒子はその統計的性質によってボソンとフェルミオンの2種類に大別されます。幾つものボソンでも同時に同じ状態を取ることができますが（ボーズ・アインシュタイン統計）、フェルミオンは一つの状態には一個しか入ることができません（フェルミ統計）。ボソンは整数のスピンを持ち、フェルミオンは半整数のスピンを持ちます。スピンとは素粒子の内部角運動量で、あたかも、素粒子が自転しているようなものです。

力の大統一の謎を解く

素粒子世界の（重力以外の）3つの力は、標準理論でよく表すことができます。力の強さを示す3つの結合定数とその背後にある3種の対称性で決まっています。最近の高エネルギー実験の結果は、3つの力の強さがエネルギーの増大とともに接近しているように見えます。果たして、3つの力は高エネルギーで等しくなるのでしょうか。

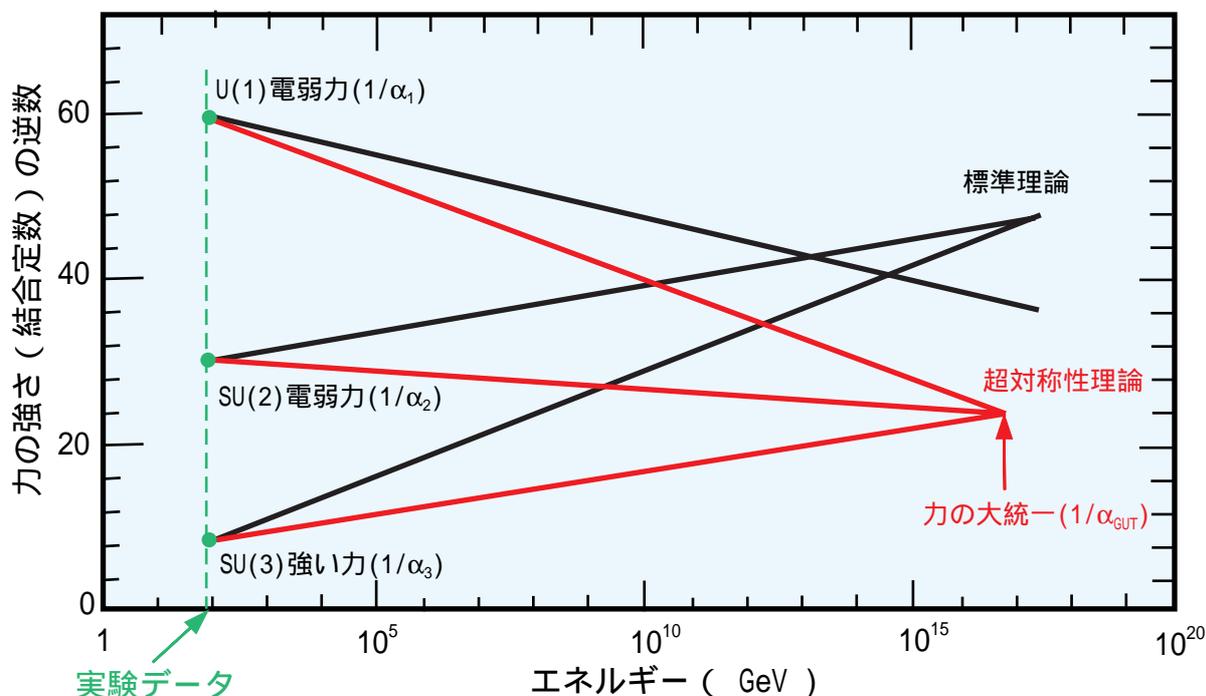
電弱力（電磁気力と弱い力）はクォーク、レプトンとも感じるのに対して、強い力はクォークのみしか感じるできません。このことはクォークとレプトンの対称性から、一見、不自然のように思われます。もし、電弱力と強い力が統一され同一起源の力となれば、この対称性は完全なものとなります。力の統一を予言または仮定するものは大統一理論と呼ばれ、その実験による究明が高エネルギー物理の一大目標となっています。

一般に、力の強さはエネルギーが大きくなると、2つの素粒子の距離が近づくとともに、量子論的なゆらぎの効果によって変わります。エネルギーとともに、電磁気力は強くなり、強い力は弱くなります。さらに、エネルギーを高くしていったらどのようなようになるのでしょうか。標準理論によれば、下図の黒い実線ようになります。3つの力の強さは互いに接近しますが、いくら高エネルギーになっても等しくなりません。お互いに関係ないのでしょうか。私たちは力の背後にあるものが、クォーク・レプトン世界の対称性であることを知っています。大統一を達成するために未知の対称性があるのでしょうか。

素粒子世界には、フェルミオンのクォークとレプトンの他に、ボゾンのゲージボゾンとヒッグスポゾンが存在しま

す。フェルミオンは半整数のスピンを持ち、ボゾンは整数のスピンを持つ素粒子です。今まで、フェルミオン中の対称性から3つの力を見てきましたが、フェルミオンとボゾンの間にも対称性がきつとあるはずで、この対称性は超対称性と呼ばれ、フェルミオンをボゾンに、また、ボゾンをフェルミオンに変換します。これに基づく超対称性理論は、すべてのフェルミオン（ボゾン）には、超対称粒子のボゾン（フェルミオン）の相棒がいることを予言しています。超対称性を仮定してみると、下図の赤い実線のように、確かに、3つの力がひじょうな高エネルギーで等しくなり、力が大統一されます。

このように、超対称性粒子を発見することが力の大統一を理解する鍵となります。超対称性は時空の対称性でもあるため、重力をも統一する超対称大統一理論へと導くものと考えられています。また、超対称性理論は標準理論では決めることのできなかつたヒッグスポゾン同士に働くヒッグス力を弱い力と結び付け、ヒッグスポゾンが比較的軽いこと（ヒッグスポゾンの質量は $150\text{GeV}/c^2$ 以下）も予言しています。このことは重心系エネルギー 500GeV のJLCがヒッグスポゾンの発見と、その精密実験に最適なコライダーであることを示しています。



3つの力のエネルギー依存性：縦軸が力の強さ（結合定数）の逆数、すなわち、力が弱いほど大きな値を取ることに注意。最新の実験データに基づいて計算すると、標準理論ではいくら高エネルギーになっても3つの力が等しくならないことが判明しました。W, Zボゾン程度の軽い超対称性粒子を予言する超対称性理論では3つの力が等しくなり、力の大統一が期待されます。

宇宙創成の謎を解く

宇宙の年齢は約150億歳と考えられています。地球を回る人工衛星として観測を続けているハッブル望遠鏡は、100億年ほど前までの宇宙の姿を鮮明に見せてくれますが、『光を通さない』ほど高温高密度状態にあった150億年前の宇宙創成時の姿を写しだすことはできません。JLCはそのような極限状態を作り出し、宇宙創成の瞬間に迫ります。

宇宙が一様に膨張していることや、宇宙マイクロ波背景放射など数々の発見から、宇宙の歴史はビッグバンより始まったと考えられています。150億年ほどたった現在、私たちはその痕跡の中で生活しています。宇宙は膨張しながら、その温度が下がり続けている黒体放射（ビッグバンの残光）で満たされています。

電子・陽電子コライダーでの高エネルギー実験は、宇宙創成直後の超高温状態を作り出します。宇宙創成から『わずか』1マイクロ秒間のクォーク・レプトンの世界を探索することができるのです。まさに、高エネルギー実験はこの最初のマイクロ秒に何が起こったのかを再現しています。

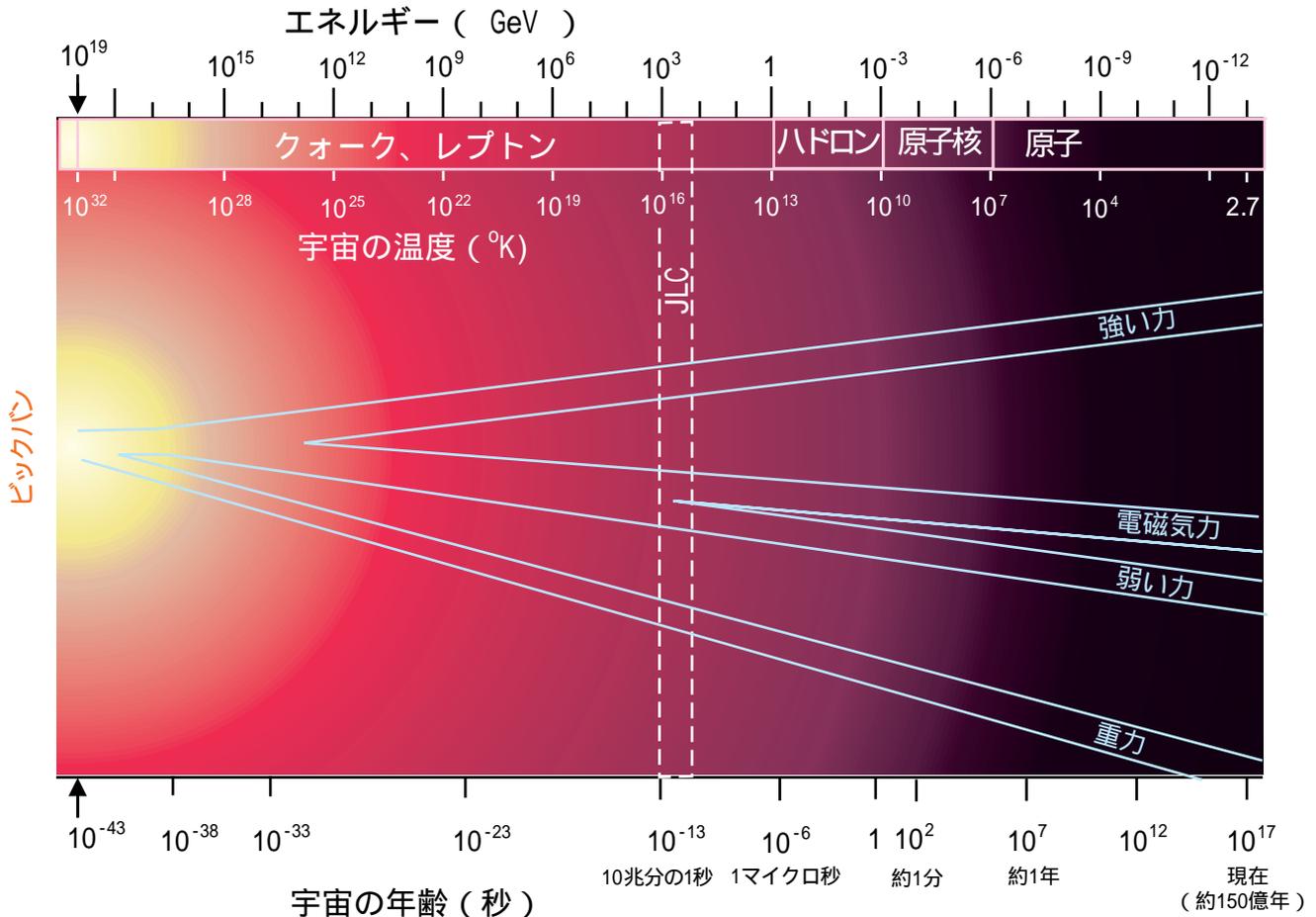
JLCで到達可能なエネルギーは、宇宙年齢の10兆分の1秒（ 10^{-13} 秒）に対応しています。温度はエネルギーに比例し、このとき、宇宙の温度は1兆度の10000倍（ 10^{16} 度）でした。

さらに宇宙創成に近づく 10^{-38} 秒のとき、力は大統一されると考えられています。

このように、JLCによって大統一理論、ひいては重力までも含む4つの力の超対称大統一理論が確立されれば、宇宙創成のほとんど瞬間まで迫ることができます。

宇宙は、『真空のゆらぎ』から生まれ急激に膨張するというインフレーションによりその全エネルギーが形成され、やがて、この真空からのエネルギーの増殖は終結し、膨張とともに温度が冷えていくビッグバンの宇宙の進化を辿ったと考えられています。現在のところ、私たちは『真空のゆらぎ』がなぜ存在したのか知る由もありません。

しかしながら、どのような宇宙や真空の対称性が宇宙創成の瞬間に存在し、約150億年を経た現在の自然法則をいかに作り上げたのかをJLCは解明しようとしています。



素粒子物理より見た宇宙の歴史：宇宙創成の瞬間には、唯一の力があったと考えられています。ビッグバン直後に、真空の相転移が起こり『対称性』が破れ、重力、弱い力、電磁気力、強い力の4つの力が形成されていきました。ビッグバンよりマイクロ秒の間、宇宙の温度（エネルギー）が急激に下がり、クォークは陽子、中性子、パイ中間子などのハドロン中に閉じ込められてしまいました。10秒を過ぎ3分の間に、重陽子、ヘリウム、トリチウムなどの軽い原子核が作られました。クォークとともに宇宙創成時にあったレプトンの陽電子は電子との衝突で消滅し、残された電子は水素などの原子中に入り込み、また、ニュートリノは約150億年経った現在まで、光子（ビッグバンの残光）とともに宇宙を満たしています。

電子・陽電子リニアコライダー計画 JLC Project

JLC計画は、質量 $175\text{GeV}/c^2$ のトップクォークの対生成、そして、ヒッグス粒子、超対称性粒子などの発見を通じて、質量起源、力の大統一、そして、宇宙創成の謎を突きとめようとするものです。そのため、JLCは現在の電子・陽電子コライダーの数倍の高エネルギー衝突を目指しています。

電子は陽子に比べて約2000分の1の小さな質量しか持たない最も軽い荷電粒子です。JLCに必要な高エネルギーを得るためには、電子を一直線に加速しなければなりません。高エネルギーの電子を曲げると放射光を放ち、エネルギーを失ってしまいます。電子の場合、直線加速は最も効率良く高エネルギーを達成する方法なのです。

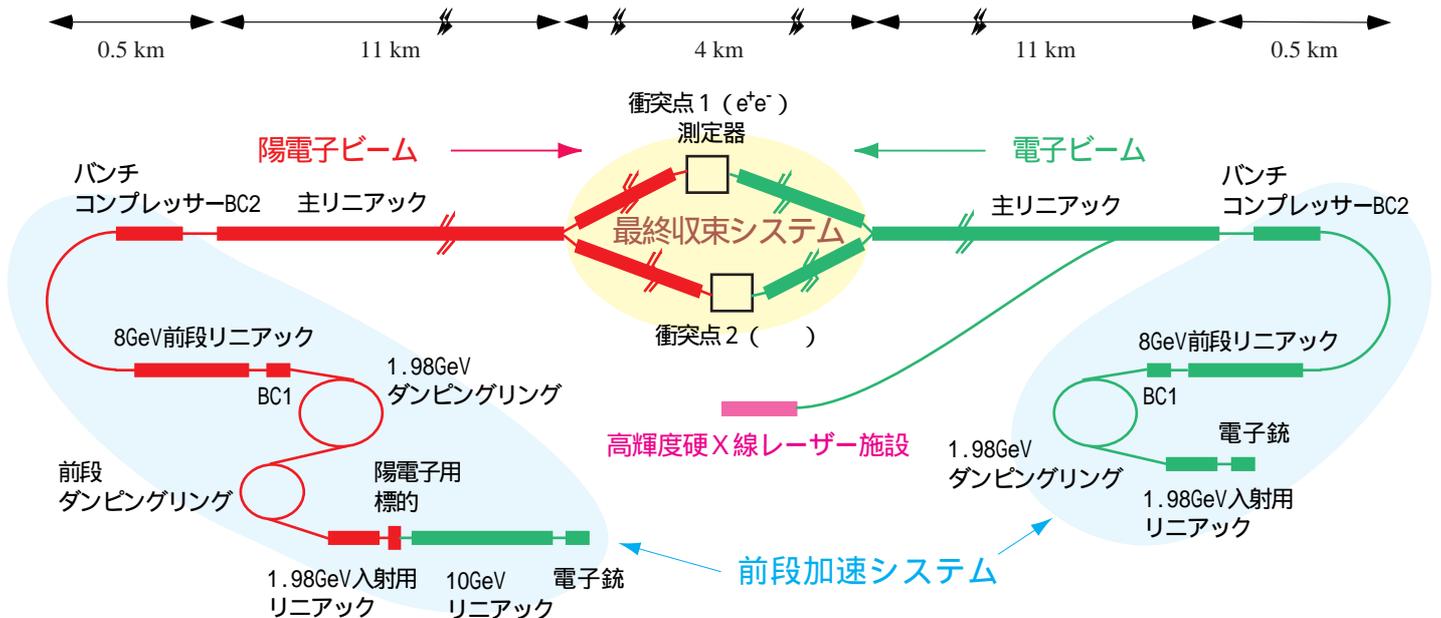
JLCは、前段加速、主加速そして最終収束システムより構成され、地下トンネル内に設置されます。

前段加速システムで超高質のビームを用意します。まず、多バンチ構造を持ち、大強度で安定なビームが電子銃で生成されます。入射用リニアックでの加速後ダンピングリングに入射され、細く平行な質の高いビームに仕上げられます（陽電子ビームラインには、陽電子生成のための10GeVのリニアック、金属標的で生成された陽電子に対して十分に入射間口の広い前段ダンピングリングが加わります）。こうして得られた超高質のビームは、より高い周波数の主リニアックで効率よく加速できるよう、そのバンチ長をバンチ圧縮器（BC1、BC2）で数mmから約0.1mmへと順々に短くします。

主加速システムは電子・陽電子ビームを超高質を保ったまま一気に加速します。向かい合う2つの長さ11kmの主リニアック（主線形加速器）を、一直線に並べます。主リニアックは、 $30\text{MeV}/\text{m}$ 以上の加速勾配の電場で満たされる加速管と、加速電場を作り出す大出力マイクロ波増幅管（クライストロン）などから構成されています。加速最終段階で、ビームエネルギーは250GeVに達し、アインシュタインの有名な式、 $E=mc^2$ 、が予想するように、電子の有効質量は数10万倍まで増大します。

最高エネルギーを得たビームは、最終収束システムで、垂直方向に数nm（ナノメートル）、水平方向に百数十nmの大きさまでぎゅっと絞られます。これら2つの扁平なビームが交差すると、電子と陽電子が正面衝突しやすく、持ち込んだ全部のエネルギーを費やして素粒子反応を引き起こし、測定器で観測されます。

また、JLCには、波長オングストローム領域の高輝度硬X線レーザー施設も併設することができ、物質科学、生物物理、医学、精密工学などの分野に広く利用されます。



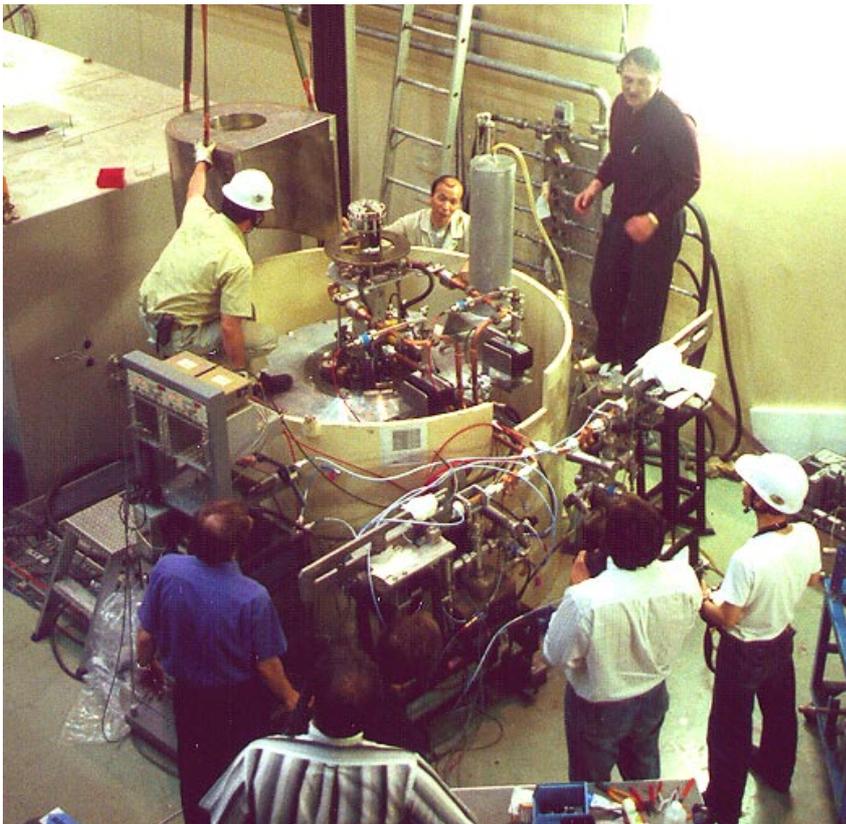
JLCの概念図：衝突点は2箇所設けられます。第2番目の衝突点は電子・陽電子衝突のほか、さらに素粒子反応の可能性を拓げる、光子・光子、光子・電子そして電子・電子の衝突実験にも利用することができます。また、JLCでは偏極率90%以上の電子ビームを用いた精密実験も行われます。JLCの超高質で高エネルギーの電子ビームは、高輝度X線レーザーを容易に励起することができます。

高い加速勾配に挑む（1）

JLCの実現に向けて様々な開発研究が、民間企業や外国研究機関との共同で行われています。加速器技術開発は、「高エネルギー物理学分野における日米科学技術協力事業」の重要な課題の一つともなっています。

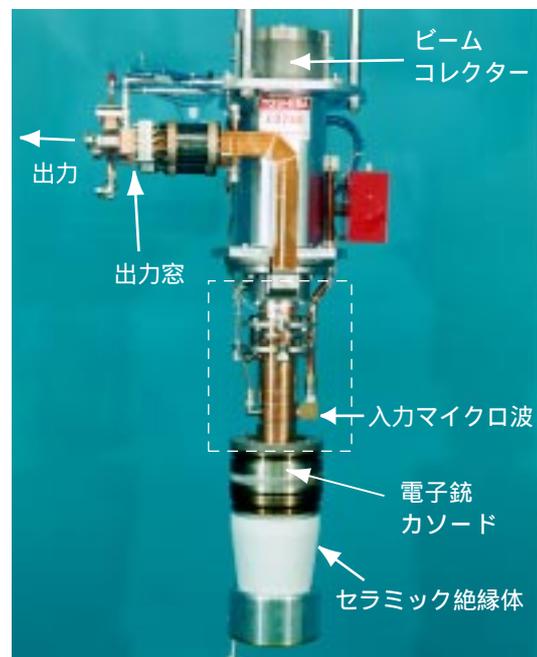
クライストロン（大出力マイクロ波増幅管）

ビームは一直線に並んだ加速管で加速されます。ビーム通過に合わせてマイクロ波が加速管に送られ、電子や陽電子ビームは、その高周波電場の中をあたかも波乗りをするかのように加速されます。電子・陽電子の衝突エネルギーの500GeVを得るためには、1メートルあたり30MeV以上の加速電場が必要になります。これは従来より数倍高い加速勾配です。一般に、周波数の高いマイクロ波ほど、より強い加速電場を加速管内に誘起し、しかも効率良くビームを加速できます。このために、従来の2倍（Cバンド、波長約5cm）から4倍（Xバンド、波長約2.5cm）の周波数の大出力マイクロ波を作り出すクライストロンを開発しています。



Xバンド（11.4GHz, 波長2.5cm）クライストロン：主リニアックの運転には75MW出力のクライストロン（出力パルス幅1.5 μ sec）が用いられます。一般に、マイクロ波の波長が短くなるとクライストロンの内部構造も細くなり大電流を取り扱うのが難しくなります。特に、パルス幅が広がったとき放電が起こりやすくなり、動作が不安定となります。ここが技術開発のポイントです。現在のところ、出力パルス幅200nsecで72MW出力のものが開発されています。また、永久磁石の周期的な収束磁場を持つクライストロンの開発は、ロシアとの共同研究(写真)で行われています。クライストロンはほぼ写真中央のパルストランスの油槽タンクに囲まれ、その上部のみが見えています。収束磁場として電磁石に代えて永久磁石を用いることによって大幅な省エネルギー化がなされています。最近、3次元の電磁場シミュレーションプログラムが開発され、これまで得られた性能が正確に再現されるようになりました。これにより技術開発の裏付けがなされ、もうすぐ、要求される性能を十分に満たすものが開発されるものと期待されています。

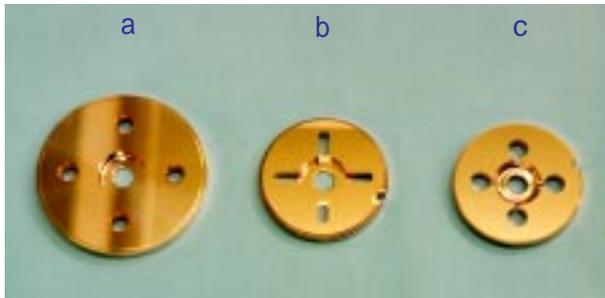
Cバンド（5.712GHz, 波長5cm）クライストロン：写真のクライストロン（全長約120cm）は、Cバンド周波数として世界最大の出力を持っています。写真下部の電子銃で作られた大電流・電子ビームは、-350kVの高電圧パルスで加速され、数百ワットの入力マイクロ波を50MWまで増幅します。増幅されたマイクロ波は出力窓より取り出されます。ダッシュ線で囲まれた領域は収束用の磁場中に置かれます。このクライストロンは2.5 μ secのパルス幅と50MWの出力を持ち、毎秒50回の繰り返しで安定に動作しています。こうして得られた性能はJLC（主リニアック）に必要な条件をほぼ満たしています。また、スマートモジュレーターと呼ばれるクライストロン用高圧パルス電源は、韓国の浦項（ポーハン）工科大学・浦項加速器研究所（PAL）やCERN（ヨーロッパ素粒子研究所）との共同で設計・開発されました。この電源はこれまでのものと比べてひょうに小型で、今後、さらに高効率、高信頼性しかも低価格のものへと発展していくと期待されています。



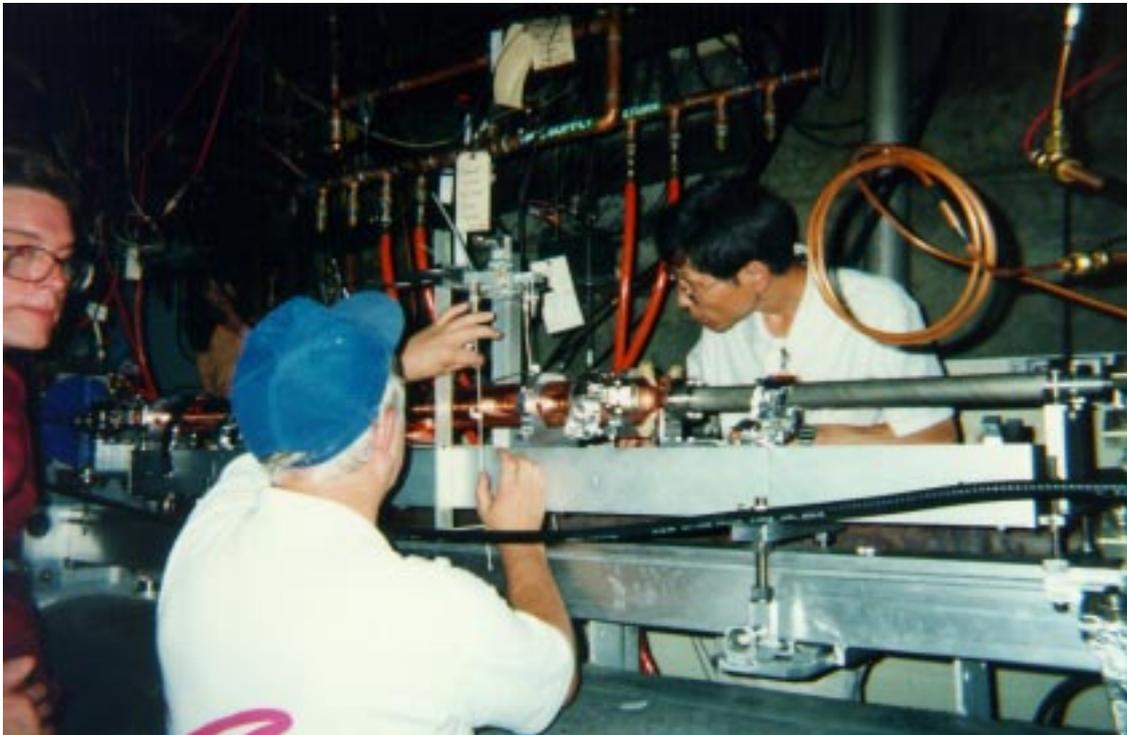
高い加速勾配に挑む（2）

加速管

主リニアックは、電子（陽電子）ビームを一気に最終エネルギーまで加速し、実験に提供します。この動作を毎秒150回繰り返します。1回ごとに必要なビーム強度は、近接した約100個の粒子群（バンチ群）に分散させて実現します。それでも1つのバンチには数10億個もの電子（陽電子）が含まれています。バンチの長さは約0.1mmで、各々のバンチは2.8ナノ秒の時間間隔、すなわち距離にして84cmの間隔に並びます。この時間間隔がひじょうに短いため、すぐ前を光速で走るバンチの影響が無視できなくなります。これはバンチと加速管の電磁的相互作用によって、次に来るバンチの加速電場が乱されるためです。この影響を取り除く特殊なセル構造を持つ加速管を開発しています。このセルの配列が少しでも曲ると、ビームの性質を崩してしまうため、かつてないほどの精密な加工と接合技術の開発も行われています。



加速管のセル構造：KEKの工作センターで超精密加工された3種類のセル（銅製）。ビームはこのセルの中心を通過します。aの外径は80mmでbとcは60mm、厚さはともに8.7mmです。このセルを150から207枚ほど積み重ねて、全長1.3m（a）と1.8m（b,c）の長さの加速管に高温で拡散接合します。1枚ずつのセルの内径を8mmから6mmまで少しずつ変え、ビーム通過によって誘起される擾乱電場を打ち消し合うように工夫されています。b、cの中心回りの4つのスロットでその擾乱電場を集め、さらに減衰させます。cはbの改良型でセル中心の穴などの端部に丸みを持たせ、加速電場の損失を少なくしています（省エネルギー化）。



加速管の性能テスト：KEKで設計・加工された加速管の性能は、スタンフォード線形加速器センター（SLAC）の加速管試験施設（ASSET）で、実際の電子ビームを用いて調べられました。測定された擾乱電場の減衰の様子はほぼ予想通りで、加速管としての基本的な性能を十分に持っていることが確かめられました。

ナノ秒の単位：1ナノ秒は10億分の1秒で、nsec（ナノセカンドと読む）と表示することもあります。また、1秒の1,000分の1は1ミリ秒（msec）、さらにその1,000分の1は1マイクロ秒（μsec）と呼ばれています。1ナノ秒は1,000の1マイクロ秒です。さらに、1ナノ秒の1,000分の1は1ピコ秒（psec）と呼ばれています。一般に、ミリ、マイクロ、ナノ、ピコの単位は1,000分の1ずつ順々に小さくなる数を表すものです。

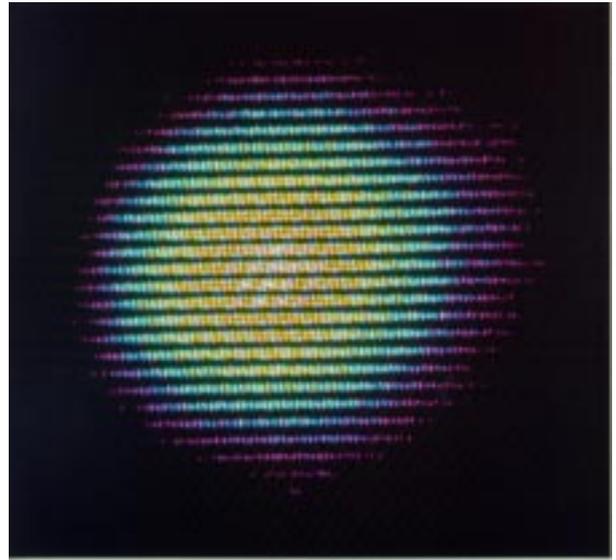
ナノメートル焦点に挑む

高倍率の電磁石光学システム

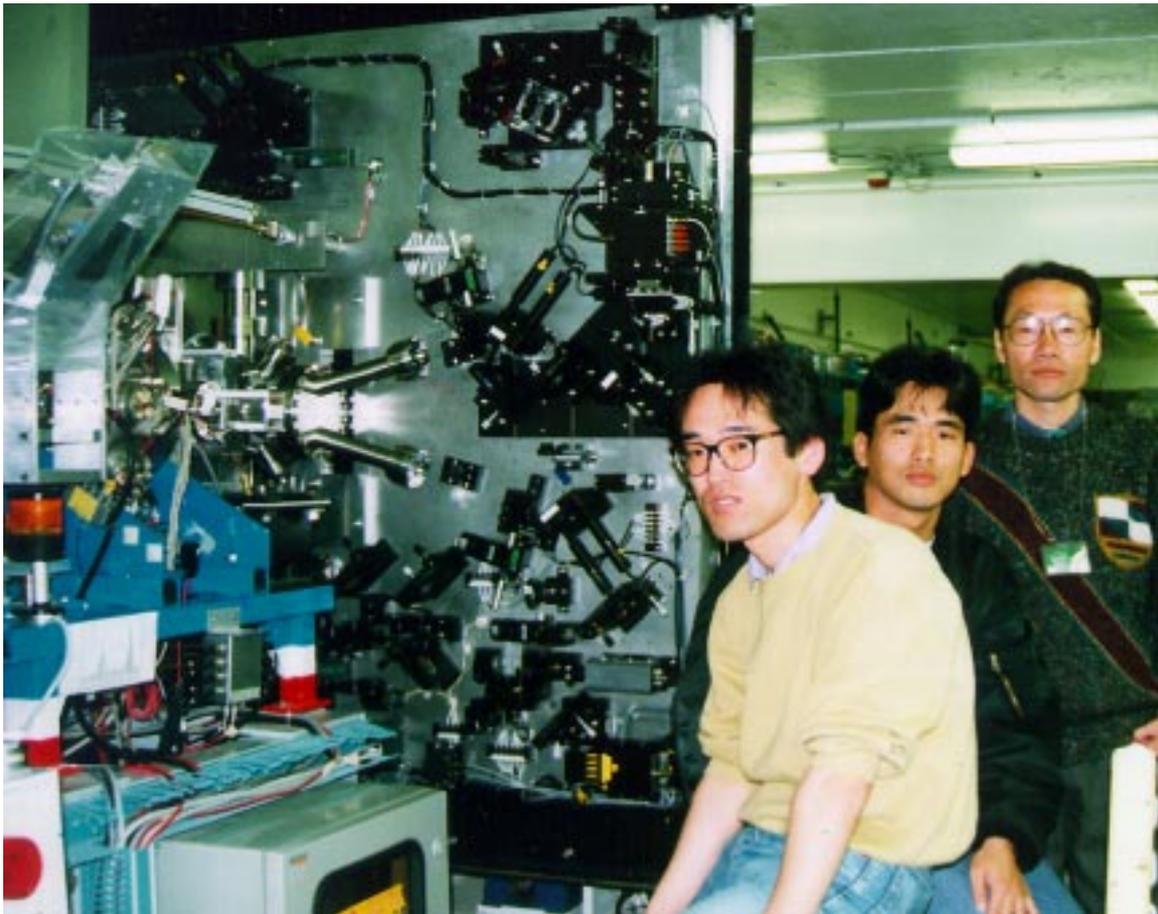
ビームを衝突点直前で、ミクロンサイズから3ナノメートル(nm)ほどの大きさまで絞り込まなければなりません。この大きさは原子の10倍程度という非常に小さなものです。しかも、数10億個もの電子の集団をこの大きさに収束させなければなりません。ここには、2つの開発要素があります。

1つは数百分の1の倍率を持つ電磁石光学システムです。このようなシステムはスタンフォード線形加速器センター(SLAC)において、日本、米国、ロシア、ドイツ、フランスなどの国際協力で実現しました。

もう一つは、そんな小さなビームサイズを測る技術です。通称、新竹モニターと呼ばれるレーザー干渉縞を利用したビームプロファイルモニターが新案・開発されました。このモニターにより、実際にビームが60nmまで絞られたことが確かめられ、この高倍率の光学システムが可能ことが実証されました。あとは、入ってくるビームの質が上げれば良いのです。



干渉縞のCCDカメラ像：写真の干渉縞のピッチはCCDカメラ撮影のために10 μ mに設定されています。実験には0.5 μ mピッチが使用されました。



新竹モニター：スタンフォード線形加速器センター(SLAC)の収束試験施設(FFTB)に設置されたビームサイズを測る装置。波長1,064nmのNd:YAGレーザーの光を2つに分け、小角度で交差させて、ビームライン上に半波長の周期的な干渉縞(上の写真を参照)を作ります。この干渉縞にFFTBビーム限界の最小60nmまで絞られた電子ビームを衝突させます。電子ビームの重心の位置を少しずつ変えて、コンプトン散乱された光子を下流で測定します。こうして得られた光子数は干渉縞と同じようなパターンを示します。このパターンの鋭さよりビームの大きさがわかります。干渉縞の周期がレーザー光の波長で正確に決められているため、ビームの大きさを正確に測定することができます。この方法はJLCでも利用されます。

超高質のビームに挑む

問題になるビームの質というのは、ビームの持っている元々の拡がりです。これはエミッタンスと呼ばれる量で、ビーム中の電子の位置と向きのはらつきを表しています。衝突点でビームをナノメートル級のサイズまで絞るためには、このエミッタンスを非常に小さくしておく必要があります。有限の大きさを持たない点光源からの平行光線でなければ、光を一点に収束させることはできないのと同じことです。

こんな超高質ビームを用意するのが前段加速システムで、JLCの性能を左右する心臓部です。

先端加速器試験装置（ATF）

目標のエミッタンスは、今までの100分の1という小ささです。これを達成する技術を開発し実証するために、KEKに先端加速器試験装置（ATF）が建設されました。

ATFは入射用1.54GeVリニアックと、超低エミッタンスビームを作り出すダンピングリング、そして、ビームサイズ測定器などの設置される取り出しビームラインより構成されています。ビーム中の電子は円軌道

を回りながら、放射光を放出しエネルギーを少しずつ失います。このとき、ビーム中心軌道方向に垂直な運動量成分も失います。また同時に、電子はリングの加速空洞でビーム中心軌道方向に加速されます。こうして失われたエネルギーが補給され同一軌道を回り続けるうちに、垂直な運動量成分の少ない、平行度の高い電子ビームが得られます。これは放射減衰効果と呼ばれています。入射時の断面積が直径1mm程度のビームは、100分の1秒以内に水平方向0.04mm、垂直方向0.006mmの大きさまで縮小されます。このような超低エミッタンスを達成するためには、高性能の電磁石、高周波加速システム、高精度ビーム位置モニター、そして高度なコンピュータ制御システムなどが要求されます。

超高質ビーム開発を目的とした試験装置は、世界でATFしかありません。ですからKEKは、ATFを世界中の加速器研究者に開放し、国内の大学や民間企業、アジア諸国や欧米諸国の研究機関との共同研究の場としています。



ATFのダンピングリング：周長約140mのレーストラック状の蓄積型リングで、直線部（写真右手前）に、放射減衰効果を高める多極ウィグラー電磁石が設置されています。また、全周にわたり合計96個のビーム位置測定モニターが備え付けられており、ビーム進行方向に対して水平、垂直位置を5～10μmの精度でビームの通過ごとに測定することができます。1997年1月より運転が開始され、水平方向のエミッタンスにおいては、すでに当初の目標が達成され世界最小の値が得られています。

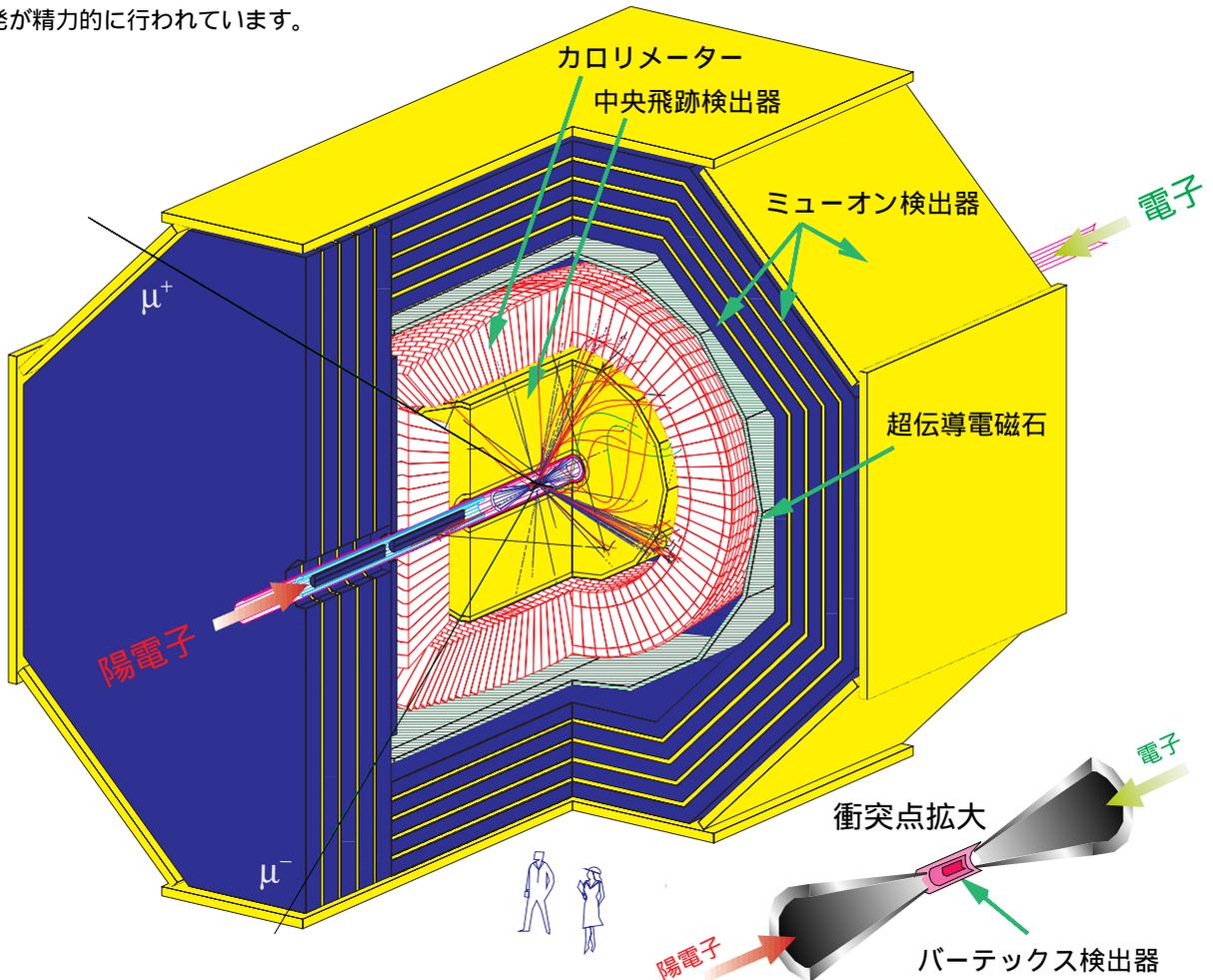
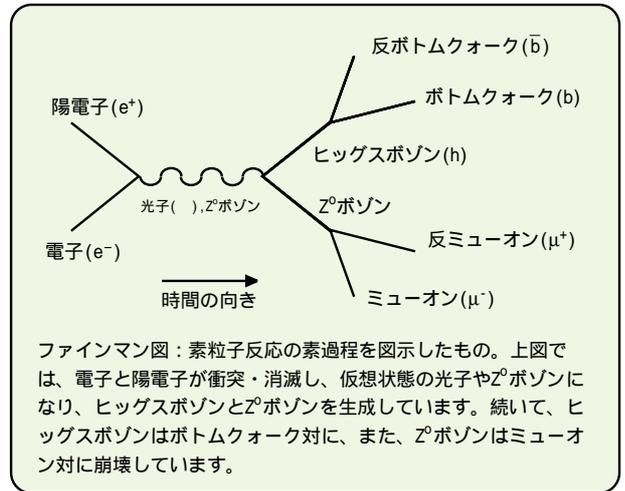
素粒子反応を見る『眼』：測定器

JLC実験では、ヒッグスボゾン、クォーク、レプトン、光子、グルーオン、W、Zボゾンなどを精度よく再構成して、素粒子反応の素過程を示すファインマン図のように観測することを目指しています。

JLC測定器は、大別して二種類の検出器より構成されています。一つは荷電粒子の飛跡を測定するもので、ビームラインに近いほうからパーテックス、中央飛跡、ミュオン検出器の3つがあります。もう一つは、ミュオン以外の荷電粒子や電荷を持たない中性粒子のエネルギーを測定するカロリメーターと呼ばれる検出器です。ミュオン検出器以外のすべての検出器は、超伝導電磁石の強い磁場（中心で20キロガウス）中に設置されます。

JLCでは、電子・陽電子の『衝突・消滅』によるクォーク対生成の場合、一度に約80個の粒子が作り出されます。その約半分を占める荷電粒子は飛跡検出器に電気信号を誘起し、また、中性粒子とともにカロリメーターにも電気信号を残します。その情報量は1事象あたり平均で数メガバイトにも達します。これはトリスタン実験の数十倍から100倍に相当します。このような大量なデータの高速な収集、解析そして保存には、最先端の技術が使用されます。

生成後、わずか20ナノ秒ほどで検出器を通り過ぎて行く多数の粒子を精密に観測することにより、初めてどんな素過程が起きたかが分かります。これを可能にするため、検出器の開発が精力的に行われています。



JLC測定器の概念図：図中には、右上図のファインマン図に対応するヒッグスボゾン生成のシミュレーションも描かれています。陽電子ビームの上流側にZ⁰ボゾンの崩壊したミュオンと反ミュオンの飛跡が見えます。図中の飛跡で示されるように、電子そして陽子、パイ中間子などはカロリメーターでほとんど吸収されてしまいますが、ミュオンは一番外側に配置されるミュオン検出器も通過してしまいます。このミュオン対と反対方向に、ヒッグスボゾンの崩壊したボトムクォーク対の作る2つの粒子群（ジェット構造）が見えます。

いろいろな粒子検出器の開発

測定器を構成するいろいろな粒子検出器の開発は、全国の大学、研究機関の共同研究として行われています。

バーテックス検出器

この検出器の役割は、生成後、数mmほど走り崩壊してしまうボトムやチャームクォークの崩壊点を測定し、それらを識別することです。ビームラインにひじょうに近く設置されるため、2次元の空間座標が同時に、しかも精密に(数ミクロンで)測定できるCCD検出器が開発されています。現在、CCDはビデオカメラ、天体のX線検出器などに広く使用されていますが、JLC実験には、常温で熱的ノイズの小さい、そして、できるだけ高速な読み出しのできるものが求められています。また、個々の画素からの信号を別々に読み出す、いわゆるピクセル検出器の開発研究も始まっています。

中央飛跡検出器

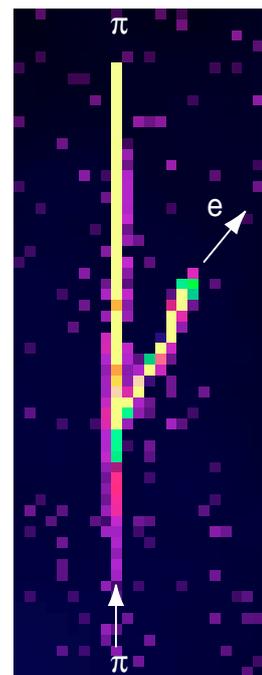
電荷を持つ荷電粒子が磁場中を通過するとローレンツ力を受け曲げられます。その曲率から、荷電粒子の運動量が求められます。ガスを検出媒体とする中央飛跡検出器は、超伝導磁石による一様なソレノイド磁場中に置かれます。荷電粒子は、その通り道に沿ってガス分子をイオン化します。中央飛跡検出器はその飛跡を精度よく検出するものです。

一般に荷電粒子の曲率は、運動量が高くなるとともに反比例して小さくなり、より良い飛跡検出精度(空間分解能)で、広い空間領域にわたって測定する必要があります。新粒子を見分けるだけの運動量分解能を

得るために、この検出器は直径4.6m、全長4.6mの平行形状(円筒形)をしたものとなります。このような大きなものが、必要な性能を持って本当に製作できるのかが研究開発のポイントとなっています。

カロリメーター

ニュートリノ以外のすべての粒子のエネルギーを測定します。一般に、粒子は物質中でその全エネルギーを消費するまで反応を起こし続け、そこで消費されたエネルギーは最後には熱として吸収されてしまいます。この反応過程には電子や光子が起こす電磁シャワーと、ハドロンが起こすハドロンシャワーの2種類があります。この全熱量を測れば、入射した粒子のエネルギーを知ることができるため、このような検出器はカロリメーターと言われます。実際には、熱量ではなくシャワーによって生成される粒子が検出器に与える電気信号が測定されます。JLCのエネルギーでは、クォーク、グルーオンは多数のハドロンからなる粒子群(ジェット)として観測されます。そのジェット中に、中央飛跡検出器では検出されない中性ハドロンも多数含まれています。したがって、クォーク、グルーオンのエネルギー測定で、カロリメーターはなくてはならない検出器です。エネルギー分解能がよく、しかも、全く性質の違う電磁シャワーとハドロンシャワーを同等に検出できるカロリメーターが開発されています。



CCD検出器：ビーム衝突点附近に置かれ、ボトムクォーク(中間子)等の2次、3次崩壊点を数 μm の位置分解能で測定します。右図はパイ中間子がCCD検出器を通り抜けて観測された画像です。小さな四角形の画素(ピクセル)は $24\mu\text{m} \times 24\mu\text{m}$ の大きさで、色の明るいほど大きなシグナルを表しています。パイ中間子は途中でシリコン原子から電子を蹴り出しています。

JLCでのベンチャービジネス

高輝度硬X線レーザー：原子・分子世界を照らす光

私たちは可視光、赤外線、X線、γ線そして放射光などいろいろの波長の光によって、大自然の風景、天体、人体、物質の分子構造、そして素粒子反応などを観測してきました。より短い波長で、より微細な構造が見えるのを知っています。また、ひじょうにコヒーレントなレーザー光による干渉を利用したホログラムにより、3次元的に虚像を作れることも知っています。夢のような高輝度硬X線レーザーを手にしたなら、私たちにどのようなことができるのでしょうか。

JLCの超低エミッタンスの高エネルギービームを用いると、1ミクロンの1万分の1の微細なオングストローム領域 ($\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$) の波長を持つ、硬X線レーザーを作ることができます。波長0.2~2 \AA に対して8~18ギガワットの最大出力を得ることができます。

原子の大きさは1 \AA 程度で、分子は原子の10倍くらいの大きさです。このコヒーレントで高輝度な硬X線レーザーによって、原子・分子の3次元的な構造を直接知ることができます。この応用は物質科学、生命科学、精密加工などの分野に波及します。

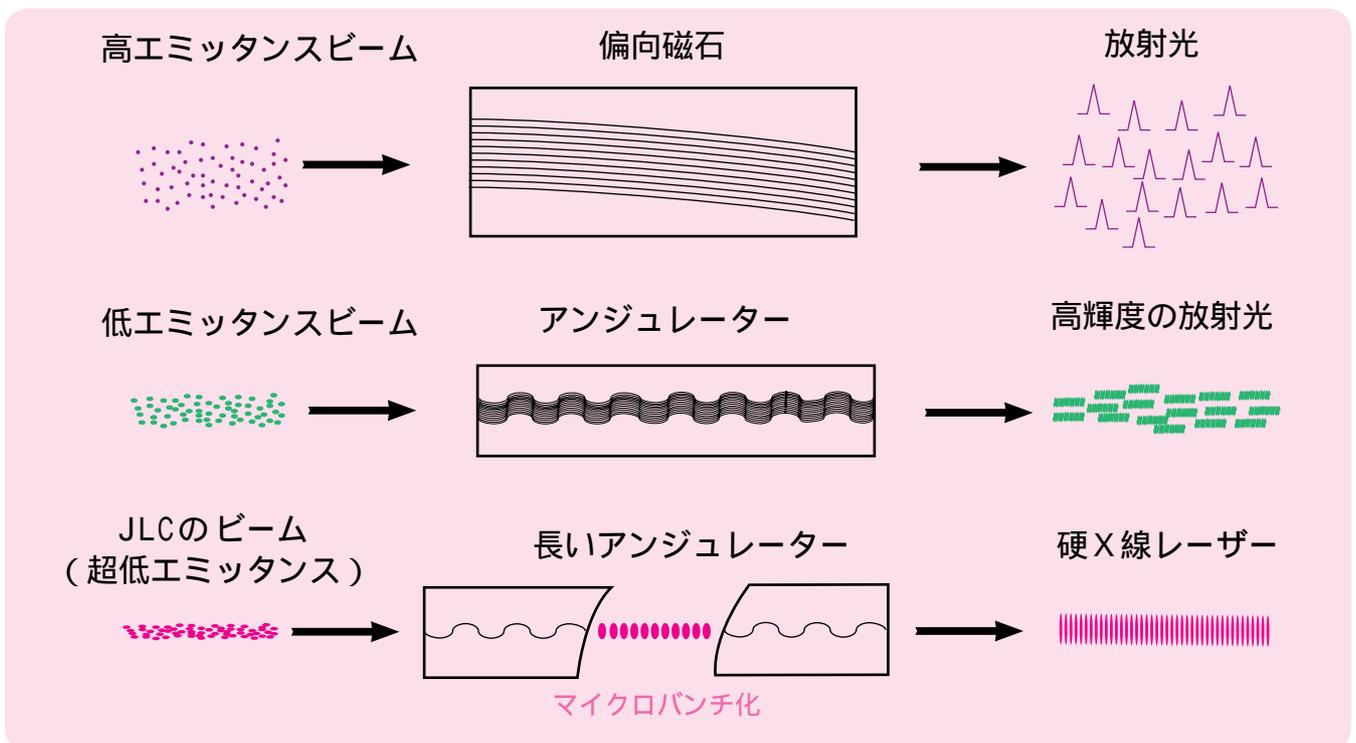
例えば、結晶、アモルファス、液晶中の原子配列を3次元的に透視できます。相転移の行われる中の原

子の動きなど、0.1ピコ秒程度の時間分解能でリアルタイムに観測することができます。

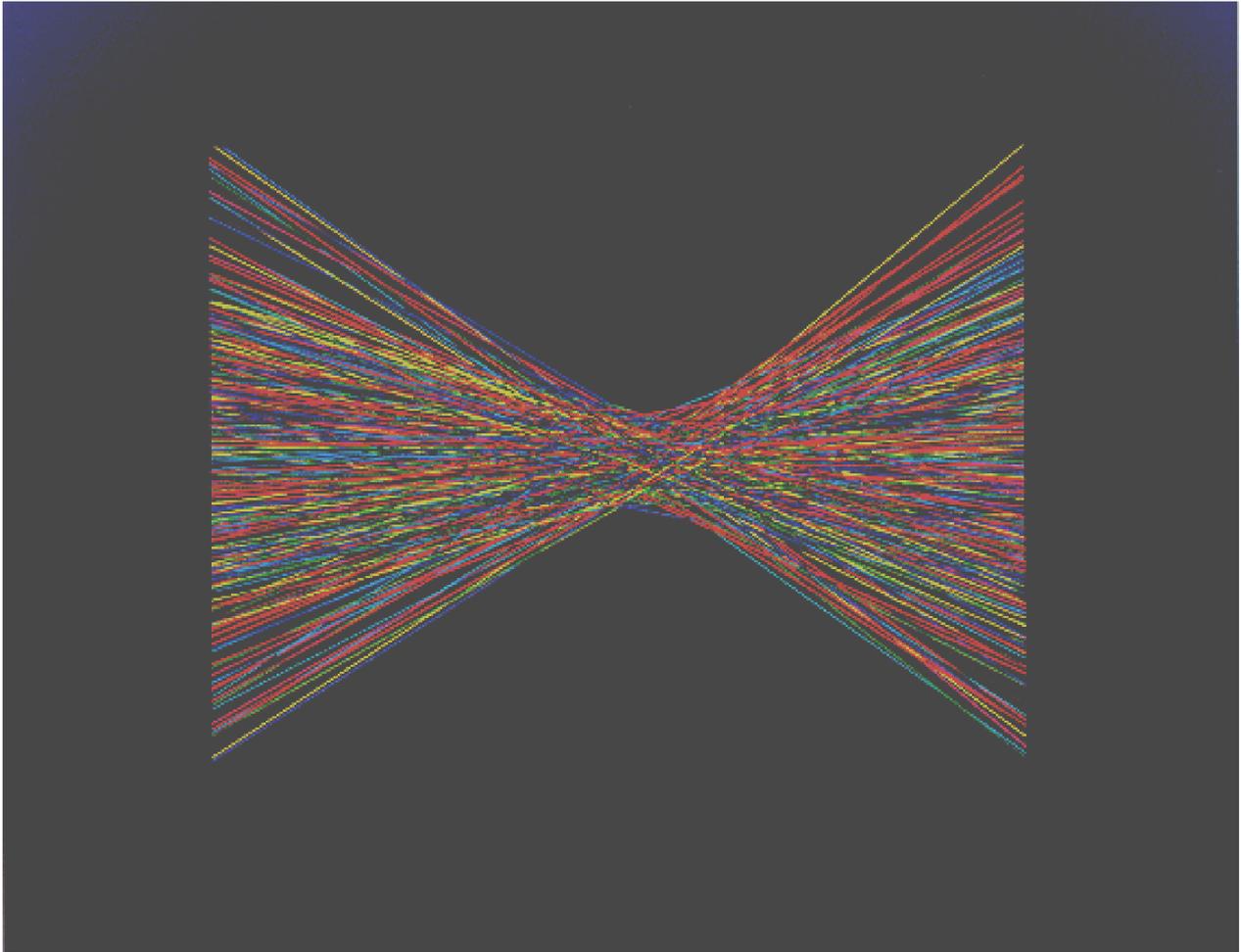
現在のところ、遺伝子の2重らせん構造は電子顕微鏡でしか観測されていません。この方法は焼き魚を眺めて、海、川などで泳ぎ回っている魚を想像しているようなものです。高輝度硬X線レーザーは生きたままの状態で、2重らせん構造はもとよりエイズウィルス、癌細胞など生物の原子・分子構造を観測できる全く新しい分野を切り開くものです。これにより、不治の病といわれる病気を直すための究極的な方法を手にすることができると期待されています。

現在の可視光レーザーによる加工精度はミクロン程度ですが、そのさらに1000分の1のナノメートルの加工精度が得られます。高輝度硬X線レーザーは、原子を1個づつ配置したり除去したりすることも可能にするでしょう。さらに、レーザーの干渉を利用することができれば、ナノメートル以下の超精密加工も夢ではありません。それによって、コンピュータのメモリなどICの集積密度の飛躍的な増大などが期待されます。

このように、高輝度硬X線レーザーのもたらす応用分野への影響には、はかり知れないものがあります。



放射光と硬X線レーザーの生成方法：電子ビームは、大きなエミッタンスを持つものでも、偏向磁石で曲げられると放射光を放出します。また、低エミッタンスの電子ビームは、磁極の向きが交互に変わる電磁石（アンジュレーター）中を通過すると、比較的高い輝度の放射光を放出します。KEK・放射光研究施設（PF）やSPring-8などの放射光施設では、このような放射光が利用されています。JLCのビームを長いアンジュレーター（100~300m）の中に通してやると、オングストローム領域の波長を持つ硬X線レーザーが得られます。このレーザー発振には、JLCのビームのように、超低エミッタンスでエネルギーの拡がりの小さい、しかも、高い強度の電子ビームが不可欠です。



ナノメートル・ビームの軌道を測る

写真のビーム軌道は、KEKで開発された新しいビーム位置モニターによって測定されました。ビームは中心で約200ナノメートルの大きさに絞られています。このモニターは高周波空洞を利用したもので、衝突点近くに設置されます。従来の数百分の1に相当する数ナノメートルの分解能でのビーム通過位置の測定を目指しています。また、JLCでのナノメートル・ビームの位置制御に威力を発揮するものと期待されています。

文部科学省
KEK 高エネルギー加速器研究機構
JLC推進室

〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1
029(864)1171

KEKホームページ <http://www.kek.jp/>
JLCホームページ <http://www-jlc.kek.jp/>