

日本は世界トップクラスの素粒子研究者を多く輩出

物理学は理論物理学と実験物理学に大別される。理論物理学は、文字通り、理論を基にして既知の実験事実や自然現象などを説明したり、あるいは未知の現象に対して数学的な仮定をベースとして物理を扱う学問のこと。日本では仁科芳雄、湯川秀樹、朝永振一郎などがその代表者である。

一方、実験物理学は、実験や観測を通して、自然現象・物理現象を理解あるいは理論物理学から導かれたことを

証明する研究方法である。日本における実験物理学者には、2002年にニュートリノの観測に成功し、ノーベル物理学賞を受賞した小柴昌俊らがあげられる。

佐伯：小柴先生は日本の実験物理の分野を開かれた先駆者的存在です。先生がアメリカ留学から東京大学に戻ってこれ、ご自分の研究室を主宰した際に最初の研究員として入ってきたのが、折戸周治先生、山田作衛先生、戸塚洋二先生の3名でした。

早稲田大学から東京大学のマスターに移ったときの私の先生が折戸先生でした。ですから私は小柴先生の孫弟子

にあたります。

私は子どもの頃、運動は普通にできた方ですが絵を描いたり考えることが好きでした。付いたあだ名は「お地藏さん」(笑)。理科や算数は得意な方でした。当時サイエンスブームで授業や教科書よりもっと専門的な科学雑誌の方に興味がありました。ビッグバンなどを自分で調べて、夢想にふけていました。大学は応用物理学科に入り、将来は研究者になると決めていました。

一般的には「夜空の星が何十万年先で、それは過去のもの、宇宙はとんでもなく広いもの」だという。ところが

視点 NO. 42

佐伯 学行 (さえき・たかゆき) 准教授のプロフィール

- 1966年(昭和41年)生まれ。
- 1990年3月 早稲田大学工学部応用物理学科卒業
- 1990年4月 東京大学大学院修士課程入学(理学系研究科物理学専攻)
- 1992年4月 東京大学大学院博士課程入学(理学系研究科物理学専攻)
- 1996年9月 博士の学位取得、博士課程卒業
- 1996年9月 東京大学素粒子物理国際研究センター助教(旧名称:助手)
- 2004年3月 高エネルギー加速器研究機構(KEK) 加速器研究施設、助教(旧名称:助手)に転任
- 2008年4月 KEK、加速器研究施設、研究機関講師
- 2015年4月 KEK、加速器研究施設、准教授
- 現在に至る。



大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構(KEK) 加速器研究施設

佐伯 学行 准教授

宇宙

極大の世界を知るには

素粒子

極微の世界を知ること

——宇宙の誕生と生命の謎の解明が期待される
国際リニアコライダー(ILC)

「素粒子物理のシンボルは大加速器である。これがなくては素粒子の実験はできず、実験なしでは物理は進歩できない」。これは2008年に小林誠博士、益川敏英博士とともにノーベル物理学賞を同時受賞した南部陽一郎博士の著書*での一節である。さらに南部博士は、宇宙の謎を解明するために「新しい素粒子や、未知の相互作用を探索するためには、加速器のエネルギーを高めてゆかなければならない」とも述べている。つまり、一つの加速器で実現可能な反応を調べ終えてしまうと、その加速器の役割は終わり、次に数段階上のエネルギーをもつ新たな加速器が必要となる。高エネルギー加速器研究機構(以下、KEK)は、まさに国際プロジェクトの一環として世界中の研究者が結集する新・加速器「国際リニアコライダー(ILC: International Linear Collider)」計画を主導している。今回の「視点」は、そのILCにスポットをあて、ILCの中核機能の一つである加速空洞技術の第一人者である佐伯学行准教授に加速器や素粒子についてお話を伺った。

*「クォーク 第2版」(南部陽一郎 著 1998年・講談社ブルーバックス刊)

小学生や幼稚園児は、「その先はどうなっているの」という疑問を持つ。大人はその先は答えられない。偉い先生でもわからない。これは自分で考えるしかない、と思ったのです。

1993年から95年までの博士課程のときでした。カナダで行われた宇宙線観測のための気球による観測器飛翔実験に参加しました。気球を30km上空のところまで上昇させ観測を行い、観

測が終わったらロープを切り離し、観測器をパラシュートで地上に帰還させるという実験です。

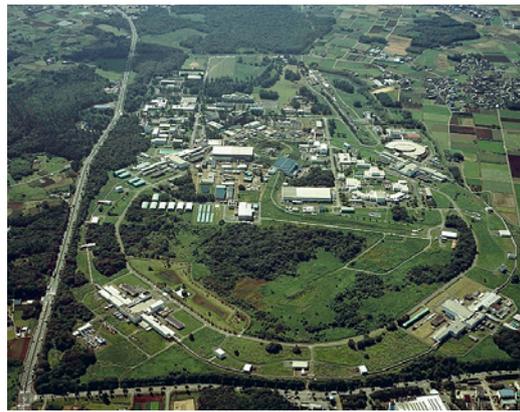
われわれ研究者と一緒に回収部隊もいますが、車でいけない場合は軍用機をチャーターしたり、自らの足で野山を駆け回ります。最悪の場合は沼地を探し回ることもありました。実験物理屋の仕事は過酷なことを身をもって体験しました。本当に体力勝負、忍耐力がなければ務まりません(笑)。このときのプロジェクトリーダーは折戸先生でした。

日本の物理学界は、宇宙の謎を解明する素粒子分野で世界トップクラスの人材を多く輩出しています。このように私もその影響と恩恵を受けた研究者の一人です。

ノーベル賞物理学賞受賞に貢献するKEKの加速器

素粒子とは、物質を構成する最小の単位のことです。それ以上細かく分けられないものとされる。何をもって素粒子とするのかは時代とともに変化して

■ KEK の歴史



KEK つくばキャンパス全景 (画像提供: KEK)

- 1971 ● 高エネルギー物理学研究所設立 (4月)
- 1976 ● 陽子加速器 (PS) で 8GeV まで加速に成功 (3月)
PS で 12GeV まで加速に成功 (12月)
- 1982 ● PF で 2.5GeV の電子の蓄積に成功 (3月)
- 1986 ● トリスタン主リング (MR) で電子・陽電子を 25.5GeV まで加速に成功 (11月)
- 1998 ● B ファクトリービーム蓄積に成功 (12月)
世界最高の「ルミノシティ」を達成。小林・益川博士のノーベル賞の実験的基礎をつくる。
- 2009 ● 日本原子力研究開発機構と共同建設の J-PARC が完成 (3月)
長基線ニュートリノ振動実験 (T2K 実験) 開始 (4月)
- 2016 ● SuperKEKB 加速器でビーム蓄積に成功 (2月)

きている。現在、素粒子研究は多くの場合、理論物理学者から導かれる理論を前提として、実験物理学者が実験で発見した事実により、理論が事実であることを証明する。こうして導き出された大発見はいずれも既成概念を大きく超える新たな科学文明の進歩へとつながるものである。

佐伯: 極微の世界ともいえる素粒子の研究には特殊な装置が必要です。たとえば、小柴先生が研究されたニュートリノという素粒子は、岐阜県神岡鉱山跡地の地下1000mにある「カミオカンデ」という観測装置で観測・研究されました。

また、梶田隆章先生は「カミオカンデ」よりも容積が15倍大きく、観測データが飛躍的に増大した「スーパーカミオカンデ」を使用してニュートリノの振動を発見し、ノーベル賞を受賞されました。この実験ではKEKの大強度陽子加速器 J-PARC で人工的に作りだしたニュートリノを「スーパーカミオカンデ」へ照射し、ニュートリノ振

動の観測に成功しました。

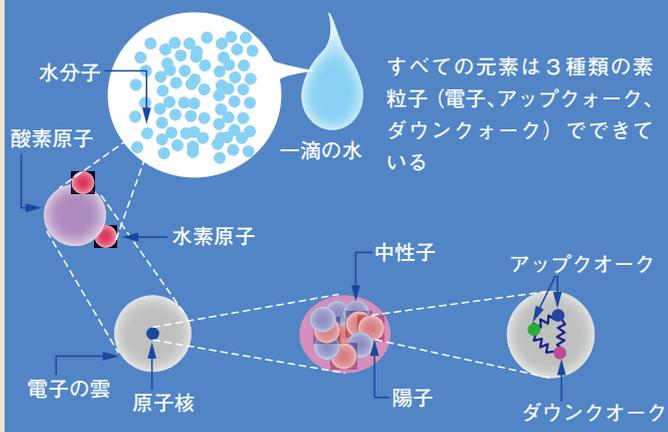
さらに、2008年にノーベル物理学賞を受賞した南部陽一郎先生と小林誠先生、益川敏英先生はいずれも理論の先生ですが、この「小林・益川理論」による新たなクォークという素粒子の存在の証明に貢献したのもKEKの加速器でした。

KEKは日本の加速器科学の総合的発展の拠点として、国内外の関連分野の研究者に対して研究の場を提供することを目的にさまざまな加速器を所有しています。

加速器の応用製品は身近に存在しません。家電製品である電子レンジは加速器の高周波電磁場発生装置と同じ原理です。がん検査で利用されるPET診断装置、電子顕微鏡、滅菌装置、X線診断機、放射線治療装置、非破壊検査機、少し古いのですがブラウン管テレビなど、意外と多いことに驚かされます。

加速器はわれわれ素粒子物理の研究者にとっては、必要不可欠な道具なのです。

図1 例えば、水は何でできているのか?



(KEK 提供資料を基に作成)



超伝導加速空洞ユニット



加速器は良質の真空が不可欠。写真はアルバック製イオンポンプ

素粒子物理研究に 必要不可欠な加速器

微小の世界を観測する道具として一般によく知られているのが顕微鏡である。しかし、分子の大きさである1億分の1cmという極微の世界を観測するには顕微鏡では理論的に観測不可能である。それができるのが加速器なのだ。

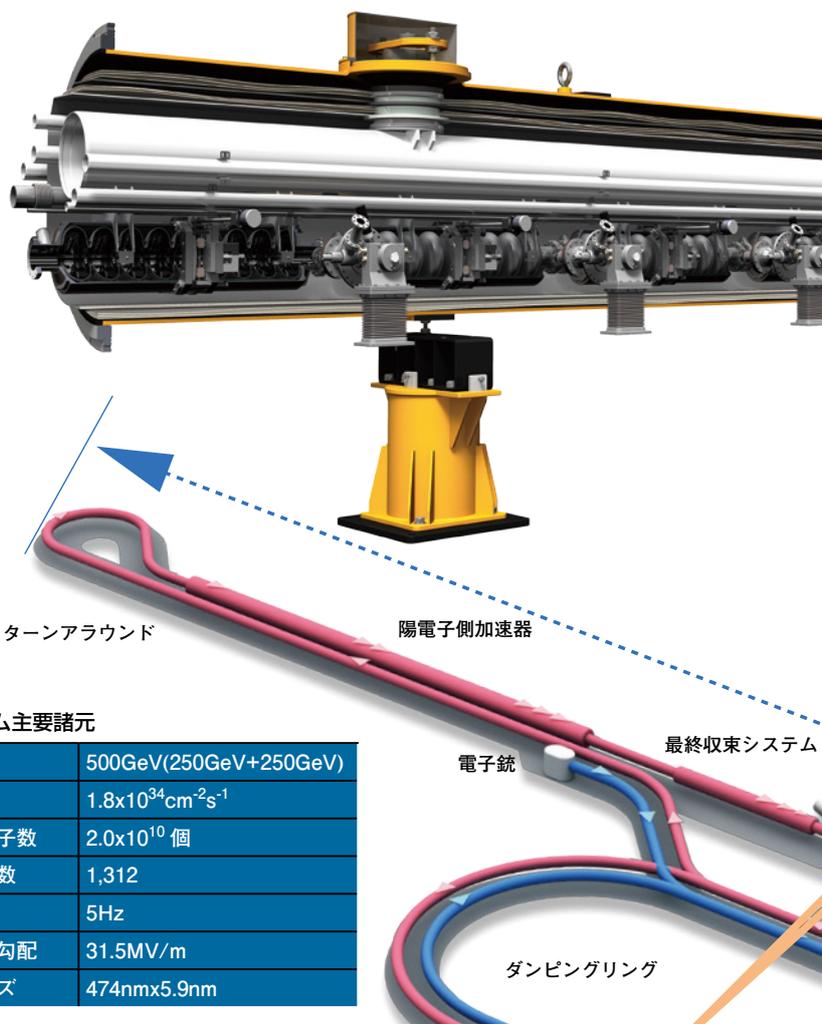
佐伯：19世紀の終わり頃、原子の中に電子があることは判っていましたが、1911年にラザフォードが原子の内部構造を見ようと、放射性元素から出るα線を原子にぶつけて、その反射と貫通の割合を観測しました。その結果、中心にプラス電荷のかたまりがあって、その周りにマイナス電荷の何かが飛んでいることがわかった。その「プラス電荷のかたまり」が原子核であり、「マイナス電荷の何か」が電子でした。

このときの「原子にα線をぶつけた」こと、これが加速器の始まりでした。今もその原理は変わりません。加速器のことを英語ではコライダー(Collider)と言い、衝突させるという意味があります。もっと細かく、詳しく原子核の中をみるには、もっと高いエネルギーで加速して衝突させなければならないことが判ってきました。

当初、原子は、電子、陽子、中性子から構成されるものと思われていましたが、その後、宇宙観測技術や加速器実験技術の発達とともに、1964年、陽子や中性子の中にさらに微細の「クォーク」という素粒子の存在が予言され、1969年、「クォーク」の存在がアメリカの加速器実験で証明されました。

1973年「小林・益川理論」により、素粒子はアップとダウン、2つのクォークだけではなく、全部で6種類あると予言され、前述の通りKEKの加速器によってその理論が証明されました。さらに電子の仲間であるレプトンなど、物質の根源とされる多くの素粒子が次々に発見されましたが、現在では「これで終わり」というわけにはいなくなっています。

つまり、我々のなじみある水素などの物質に関わる素粒子は宇宙全体の4%しかなく、正体不明の暗黒物質が23%、暗黒エネルギーが何と73%を占めるということが明らかになってきたからです。未知の暗黒物質や暗黒工



ILC 加速器のビーム主要諸元

衝突エネルギー	500GeV(250GeV+250GeV)
ルミノシティ	$1.8 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
バンチあたりの粒子数	2.0×10^{10} 個
パルス毎のバンチ数	1,312
パルス繰り返し	5Hz
主線形加速器加速勾配	31.5MV/m
衝突点ビームサイズ	474nm×5.9nm

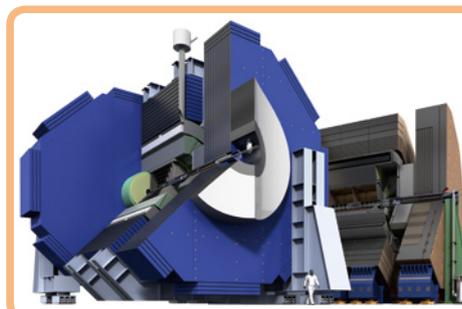


図8 ILC 検出器

(画像提供：KEK (C)Rey. Hori)

250GeV 電子ビームと250GeV 陽電子ビームとの衝突点 (Interaction Point: IP) に置かれる衝突反応検出器は非常に高い感度で一ひとつの反応に関わる粒子飛跡を捉えます。衝突反応検出器としてはILDとSiDという2つの検出器が計画されており、交互に実験に使用されます。

エネルギーの研究は、宇宙の始まりと進化に密接につながるものとされ、同時にその解明が新しい加速器への期待として高まっています。(【図2、図3】参照)

素粒子が介在する4つの力： 「電磁気力」「強い力」「弱い力」「重力」

地球、太陽系、宇宙を含むすべての自然界には物質と物質の間に基本的な4つの力である「電磁気力」「強い力」「弱い力」「重力」が働いているとされる。この4つの力には素粒子が媒介すると考えられている。

佐伯：「電磁気力」は雷や磁石などわれわれに最もなじみある力です。電荷をもつ素粒子同士に働いており、それは「フォトン」という素粒子が伝えています。

「弱い力」と「強い力」はいずれも原子核内の陽子や中性子の間で働いている力です。「強い力」は、クォークが原子核内に陽子や中性子をまとめている力です。原子核の陽子はプラスの電荷をもっていて、普通に考えると反発しあってバラバラになってしまいますがバラバラにならないのは、「強い力」でグルーオンという素粒子が陽子を結びつけているからです。(【図3】参照)

「弱い力」は、クォークやレプトンに作用し、原子核の崩壊現象を引き起こす力です。これはZ(W)ボソンという素粒子によって伝えられます。太陽が燃え続けているのもこの「弱い力」によるものです。

重力は不思議なものです。「重力」に

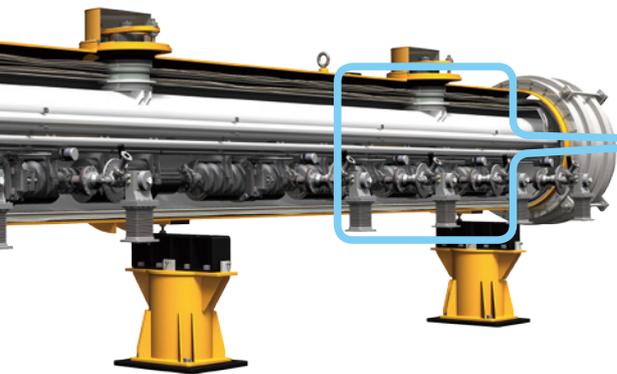


図5 クライオモジュール (画像提供: KEK (C)Rey. Hori)

クライオモジュールは、超伝導加速空洞ユニットや超伝導4極電磁石およびヘリウム配管を断熱する真空断熱容器から構成される、直径1m、長さ12mの加速ユニットモジュールです。クライオモジュールには超伝導加速空洞ユニット9台を収納するタイプと、超伝導加速空洞ユニット8台と超伝導4極電磁石1台を収納するタイプの2つのタイプがあります。ILCでは、1,680台のクライオモジュールを地下の直線トンネルに設置します。

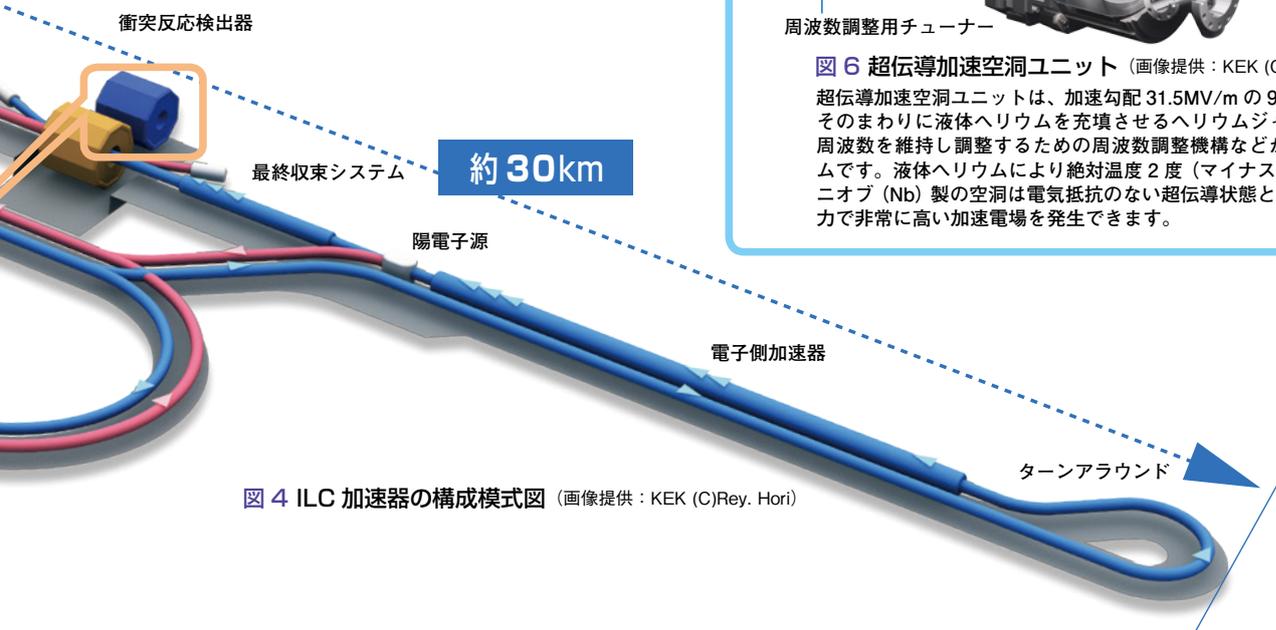


図4 ILC 加速器の構成模式図 (画像提供: KEK (C)Rey. Hori)

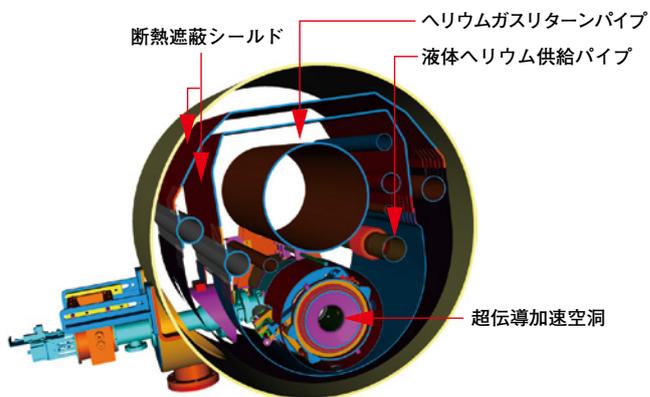


図7 クライオモジュールの断面図 (Courtesy of E-XFEL/DESY)

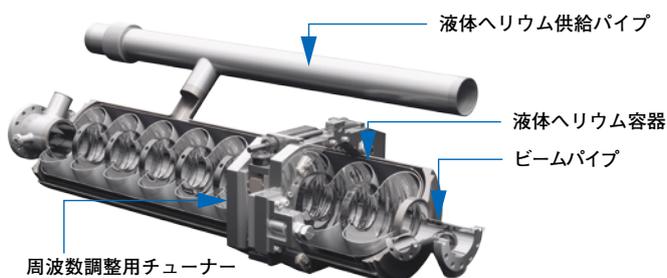


図6 超伝導加速空洞ユニット (画像提供: KEK (C)Rey. Hori)

超伝導加速空洞ユニットは、加速勾配31.5MV/mの9セル超伝導加速空洞、そのまわりに液体ヘリウムを充填させるヘリウムジャケット、空洞の共振周波数を維持し調整するための周波数調整機構などが一体となったシステムです。液体ヘリウムにより絶対温度2度(マイナス271°C)に冷やされたニオブ(Nb)製の空洞は電気抵抗のない超伝導状態となり、わずかのRF電力で非常に高い加速電場を発生できます。

ついては何も分かっていないというのが現状です。プラスとマイナスがなく、反発する力もなく、引っ張っている力のみです。それにとっても弱い力なのです。どれくらい弱いかというと、下敷きで静電気を起こして髪の毛に近づけると、髪の毛が逆立ちますが、これは地球という巨大な質量が髪の毛を重力で引っ張る力より、小さな下敷きに貯まった静電気が電気力で引っ張る力の方が強いことを示しています。

「重力(質量)」に関係すると言われるヒッグス粒子は1964年に予言されましたが、2012年になってようやく最新の加速器でみつけられました。これは各素粒子が持つ固有の質量を作り出すメカニズムの元となる粒子とされます。

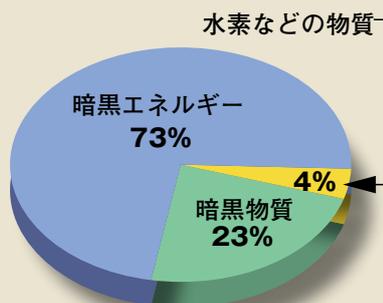
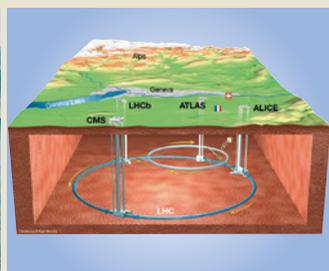


図2 宇宙の成分 (画像提供: KEK)

物質粒子			力を伝える粒子
	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	u アップ	c チャーム	t トップ
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム
レプトン	ν_e eニュートリノ	ν_μ μ ニュートリノ	ν_τ τ ニュートリノ
	e 電子	μ ミューオン	τ タウ
	ヒッグス場に伴う粒子		
			強い力 g グルーオン
			電磁力 r 光子(フォトン)
			弱い力 w z Wボソン Zボソン
			H ヒッグス粒子

図3 宇宙を形成する素粒子たち (画像提供: KEK)



地下の図解 © 2014-2017 CERN

ATLAS Experiment © 2016 CERN



LHC コントロールルーム © 2015-2017 CERN



LHC トンネル内 © 2005-2017 CERN

図9 CERN (欧州合同原子核研究機構) スイス・ジュネーブ
LHC (Large Hadron Collider) 世界最大の加速器周長約 27km
(ちなみに、JR 山手線の周長は 34.5km。写真の円周の奥側には
レマン湖とジュネーブ空港が見える) © 2001-2017 CERN

ビッグバン解明に期待される 線形加速器「ILC」

加速器は、粒子と粒子を衝突させて、その1点で起こった現象を観測する実験装置である。それは一見、宇宙とは無関係のように思えるが、実は極微の1点で起きた現象を観測することで宇宙の始まりや生命の謎の手がかりが得られる。つまり極大の宇宙を知るということは、極微の素粒子を研究することなのである。

現在、世界最高性能とされる加速器は、2008年に完成したスイス・ジュネーブの欧州合同原子核研究機構(以下、CERN)に設置されている「大型ハドロン衝突型加速器(以下、LHC)」という加速器で、周回り約27km、山手線の一周に相当する巨大な円形型の加速器だ。ちなみにヒッグス粒子の観測に成功したのはCERNのこの加速器であった。(【図9】参照)

佐伯: LHCは、2本の陽子ビームをそれぞれ逆回りに加速して、何周も加速させながらエネルギーを高めて行き、粒子を衝突させます。

しかし陽子は、クォークが3個集まった「混ざり物粒子」ともいえるものです。衝突させた結果の分析は複雑となり、誤りが生じやすくなります。さらに円形加速器は、光速近くまで加速させると、粒子は光を放って放電し、多くのエネルギーが失われてしまいます。

これらの問題を解決するには混ざり物のない電子と陽電子(電子の反物質)を用い、それらを衝突させること、またより高いエネルギーで衝突させるこ

とが求められる。そこで提案されたのが線形加速器「ILC」なのである。(【図4、図8】参照)

佐伯: ILCはこの内部で「ビッグバン」をおこし、宇宙の謎を解き明かす巨大な実験装置とも言えるものです。線形の加速器は、周回リングで何度も加速できる円形加速器とは異なり、1回きりのまさに一発勝負です。この欠点を補うには、衝突の確率をできるだけ高める必要があります。そのため、電子や陽電子の集団を収束させて高密度のビームにする必要がありますが、この機能は【図4】に示した「ダンピングリング」と「最終収束系」に設けられています。

画期的機能を有する ILCのしくみ

ILCはアジア、アメリカ、ヨーロッ

パ各国の研究者が連携・協力して計画を進めている国際的な素粒子研究プロジェクトでもある。その誘致場所は日本が最有力国となっており、九州あるいは東北の山岳地帯が建設候補地として名乗りをあげている。

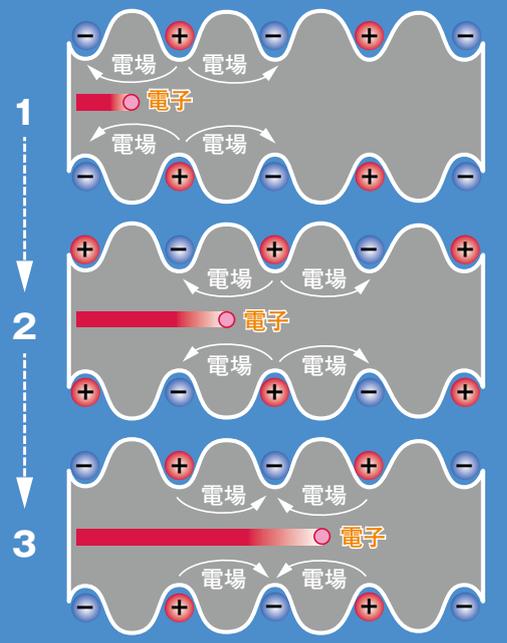
2012年にLHCによってヒッグス粒子が発見された今、研究テーマの次へのステップとして高機能加速器「ILC」にかかる期待は大きい。

佐伯: 私は1996年から6年間CERNで研究活動を行っていました。現在LHC加速器が設置されているトンネル内には、その当時、電子・陽電子衝突型加速器(LEP)が設置されており、電子・陽電子衝突実験のために稼働していました。私は、このLEP加速器で、Wボソンという素粒子の対生成現象について研究をしていました。その後、

図10 直進のしくみ

ILCは、図のように交流電場のプラスとマイナスの電場が交互に入れ替わるのを利用して電子を加速します。

高周波電力はLバンド(1.3GHz)を使用していますが超伝導加速空洞の外側から液体ヘリウムによって-271℃(2K)に冷却して超伝導を保ちますので非常にエネルギー効率が高く設計されています。



(KEK 提供資料を基に作成)

CERNでは、LEP加速器を改装してLHC加速器へと移行していくのですが、私は2003年頃から日本に帰ってILC計画の実現について真剣に取り組むようになりました。LHC加速器が完成してヒッグス粒子が発見されたとしても、暗黒物質や暗黒エネルギーの問題は完全には解決されず、必ずその次の加速器が必要になると考えたからです。

ILC加速器では、電子(あるいは陽電子)を何段にも加速してエネルギーをあげていくため、膨大な消費電力を伴います。このため、加速部分である加速空洞ユニットに超伝導技術を採用し、加速するための強い電流を効率よく使うことができるようにしています。超伝導加速ユニットを液体ヘリウムで冷却し、全体を大きな魔法瓶ともいえるクライオモジュールに入れて断熱しています。これが現在の私の専門分野です。(【図5、図6、図7】参照)

超伝導加速空洞ユニットには、超伝導材料でありレアメタルであるニオブ材を使用します。現在では、ニオブ以外にも一般に高温超伝導体と呼ばれる優秀な超伝導材料がありますが、これらのほとんどがセラミック(いわゆる陶器)状の素材であるため、このユニットのように複雑な曲線形の芋虫型に加工することができません。これが超伝導純金属であるニオブ材を使用する理由です。しかし、レアメタルであるニオブ材は高価なので、もし銅材で形を成形しておいて内面にニオブ膜を生成できれば劇的なコストダウンとなります。また、高温超伝導材料を薄膜にして内面に貼り付けることができ

ば、加工性の問題を回避しつつ高い超伝導性能が得られます。つまり、液体窒素温度で稼働する超伝導加速器が実現できる可能性もあります。このような先端薄膜技術は、超伝導加速器の飛躍的な小型化とコストダウンにつながるでしょう。これらについてはアルバックさんとKEKとの共同研究で開発に取り組んでいこうと考えています。(コラム記事参照)

また、ILCの加速には交流の電磁場を使用します。交流では電磁場の向きが一方方向ではないため、電子(あるいは陽電子)を加速するために、【図10】のような仕組みを採用しています。技術的には直流が扱いやすいのですが、直流で高速に加速するためには電圧を高くしなければなりません。そうすると加速器でスパーク、すなわち雷現象が起こって装置が壊れてしまいます。

交流を図のように使うことによって、電圧を上げなくても放電現象を回避し、加速できるのです。

科学立国日本が果たす ILC計画実現の意義と使命

ILC加速器で行う研究は「宇宙の始まりってどうなっているの」、「その先はどうなっているの」、という子供から大人まで誰もが抱く純粋な疑問を解決することである。また、佐伯准教授は「ILCの設置によって、ILCから創り出されるものは直接的、即効的な利益を生み出すわけではありません(笑)」とも断言される。

佐伯: しかし、何年か経って必ず人類にとって、科学文明の進歩に多大な貢



クライオモジュールと佐伯先生

献をすることは間違いありません。そういう確信はもっています。

世界の素粒子研究者同士は、実にオープンに国境を越えて研究成果を共有し、お互いに切磋琢磨して、宇宙あるいは生命の起源という大きな謎に地道な研究を続けています。

ILC計画を実現するには莫大な費用がかかります。国民と日本政府のILCへの深い理解と後押しがなければ実現できません。

また、ILCによって画期的な成果がもたらされると思われますが、それですべてが完結するわけではありません。科学分野は、暗黒物質や暗黒エネルギーのように、知れば知るほど新しい未知の研究領域が現れます。まさに到達点が新たな出発点となるのです。ILCの次の加速器もやがて必要となることでしょう。

私は現在ILC計画の実現に全精力を費やしていると言っても過言ではありません。ILCは、今の小学生や中学生をはじめとする将来の科学者たちのためになること、また日本の科学分野発展の礎となることを信じています。

株式会社アルバック 未来技術研究所 先進材料研究室長 永田 智啓

科学の進展を目指した強力タッグ!

佐伯学行先生とは、2012年度に私が高エネルギー加速器研究機構(KEK)に出向した際に一緒に仕事をさせていただいたことがあり、夜遅くまで測定器を組み上げたり深く議論して学んだことは今でも活かされています。

ここで得た経験・人脈を経て、私のグループでは、現在、KEKと3つのテーマについて共同研究・協力研究を進めており、その中の一つとして、佐伯先生と「超伝導薄膜加速空洞」と呼ばれる加速器の部材に関する共同研究を2016年度からスタートさせました。このテーマは、薄膜の超伝導体を利用することで加速器の性能を大幅に向上させられるという理論実証と事業化が目的であり、KEKの超伝導や加速器の知見とアルバックの薄膜技術といったそれぞれの長所を活かすことのできるテーマです。



超伝導加速空洞ユニットのモデルを前に佐伯先生(左)と私

この分野における薄膜技術は近年注目され始めたばかりで、佐伯先生との共同研究を通じてアルバックの技術力の高さを示す絶好のステージと捉えています。現在、基礎検証を進めている段階ですが一つひとつ壁を乗り越えて事業化達成に向けて邁進したいと思います。