

科学の
峰々

92

東京大学 素粒子物理国際研究センター 特任教授
理学博士

山下 ^{さとる} 了 先生 に聞く

日本発・世界の物理学を 牽引する世紀のプロジェクト 国際リニアコライダー・ILC 上

取材日：2016年5月18日
東京科学機器協会会議室

聞き手：野村 篤史 日本科学機器協会 広報委員
藏満 邦弘 同 専務理事
(取材・撮影・編集協力：クリエイティブ・レイ(株) 安井久雄)

山下 了 先生のプロフィール



1994年 京都大学大学院 博士後期課程終了
1995年 東京大学 素粒子物理国際研究センター助手
京都大学 理学博士取得
1996年 日本学術振興会海外特別研究員
1998年 CERN/LEP OPAL実験ヒッグス探索グループ統括責任者
1999年 ILCヒッグス物理研究アジア責任者
2003年 東京大学 素粒子物理国際研究センター 准教授
2012年 国際リニアコライダー ILC戦略会議委員
2014年 一般社団法人 先端加速器科学技術推進協議会
連携戦略推進コーディネーター兼
大型プロジェクト研究部会長
2016年 東京大学 素粒子物理国際研究センター
特任教授



“ビッグバンを再現する” 世界が夢見た 世紀の研究施設が日本に!

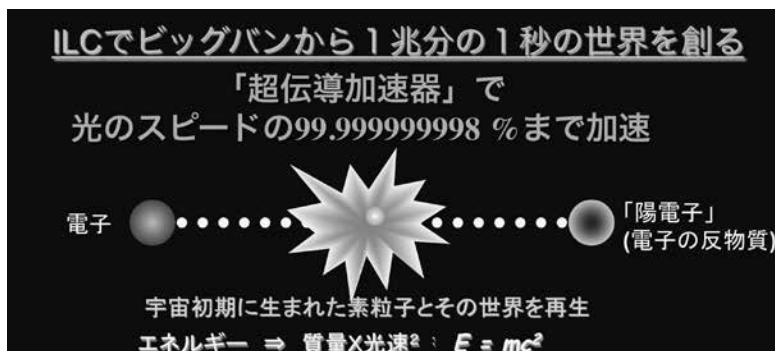
—— 山下先生が進めてこられた「国際リニアコライダー・ILC」は、世界が注目する世紀の大プロジェクトだと伺っています。国際リニアコライダー・ILCとはどのようなものなのか、簡単に教えていただけますか。

山下 わかりやすく言うと、宇宙のはじまりであるビッグバンと同じ状況を再現できる世界最大の加速器の施設、それがILCです。

ビッグバンは138億年前に起きたと言われる宇宙の始まりですが、その現象を再現できる研究施設の実現は、世界の物理学者の夢とも言えるものでした。その研究施設が日本にできるわけです。

ILCは、国内で産官学が連携して進めてきたものですが、その意味合いは日本一国にとどまるものではなく、長年世界中の国々と連携して企図されてきた、まさに夢の国際共同プロジェクトなのです。それは決して大げさではなく、人類の科学を大きく進歩させる施設になることは間違えありません。

また、その施設が日本にできるということは世界の科学、特に素粒子物理学研究の仲間が数千人、そしてILC関連企業とその仕事に従事する数万人規模の人々が集結する一大拠点になるという本当に大きな意味があるのです。



—— 世界的にも、もちろん日本の科学界においても重大なプロジェクトなのですね。

ILCは宇宙の始まりを解明するというものですが、具体的にはどのような研究施設が作られるのでしょうか。

山下 東北の北上山地の地下に全長数10kmの巨大な「直線型の加速器」が建設される予定です。最も深いところで地下約30mのところに建設されることが計画されていて、現時点での着工は、東京オリンピック後の2022年頃の予定です。建設に向けて設計や装置の調達や開発の検討、さらにはコスト管理や資金計画などが多方面で着々と進められているところです。

数10kmの直線型加速器で 光速化した粒子が ナノの精度で“衝突”

—— ILCは、従来の加速器と比べて何が違うのか…? を伺う前に、加速器とは何をするものなのか、基礎的なことから教えていただけますか。

山下 日本では現在1,400もの加速器が運転しています。加速器は端的に言うと、粒子に運動エネルギーを与えて速度を上げるための装置です。物質を構成している電子や陽電子を加速させることにより、通常では分からないさまざまな現象が分かるわけです。

粒子を加速する例として、電気のS極とN極の力で加速させるリニアモーターカーの構造と似ています。

加速器を使った研究で生活に応用されている例は数々ありますが、身近な例で言うと、以前のブラウン管テレビがそうです。ブラウン管のテレビは加速器の研究から生まれたもの、というよりも加速器そのものと言えます。



——ブラウン管テレビが加速器？
とは、どういうことでしょうか。

山下 簡単にいうと、光を曲げるための電磁石と加速するための加速装置の2つでできていて、この2つで「加速しながら曲げる」のです。ブラウン管テレビは熱によって電子を出し、それを電気で加速させ、磁石で曲げて、集光させて蛍光体に当ててテレビ画面を作っているのです。加速器はまさにそのようなもので、電子のタネを作って加速させて磁石で曲げてターゲットに当てる、という装置なのです。



電気の力で加速、地場で粒子を曲げる

——先生のお話で、加速器がすごく身近になったような気がします(笑)。

山下 では日本に建設が予定されている「国際リニアコライダー・ILC」は、これまでの加速器と何が違うかというと、ターゲットに当てるのではなく、2方向から粒子を加速させてそれを衝突させるのです。片方から電子を、もう片方から陽電子を光の速さのレベルに加速して両者を衝突させます。

英語の“collide (コライド)”は「衝突する」、 “linear (リニア)”

は「直線の」という意味で、そのまま「(国際的な) 直線型をした衝突させる加速器」=「International Linear Collider」略してILCという名称になるわけです。

——加速器というと円形のものを使い浮かべる人も多いと思います。ILCは直線型の加速器ということですが、長さはどれくらいになるのでしょうか。

山下 最初は20kmからスタートします。ですが運用してゆく中で23km、30km、50kmと段階的に長くしていく予定です。長くなるほど加速することができ、粒子に与えられるエネルギーが大きくなるわけです。円形の加速器は一度作

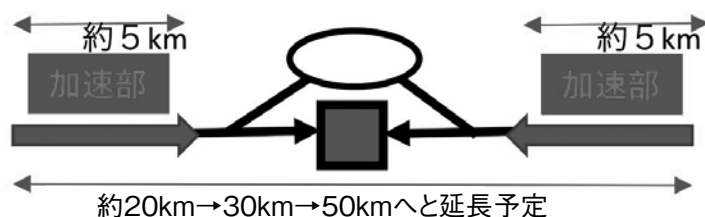
るとそう簡単に長さを延ばすことはできませんが、延ばすことができるのは直線型のメリットです。

その延ばす方法も比較的簡単で、数10kmの直線型加速器といっても実は1器約12mのモジュールを電車のように連結していく構造なのです。延ばしたくなったら連結数を増やせばよいのです。こうした多数のモジュールを連結した施設は既に実現しています。

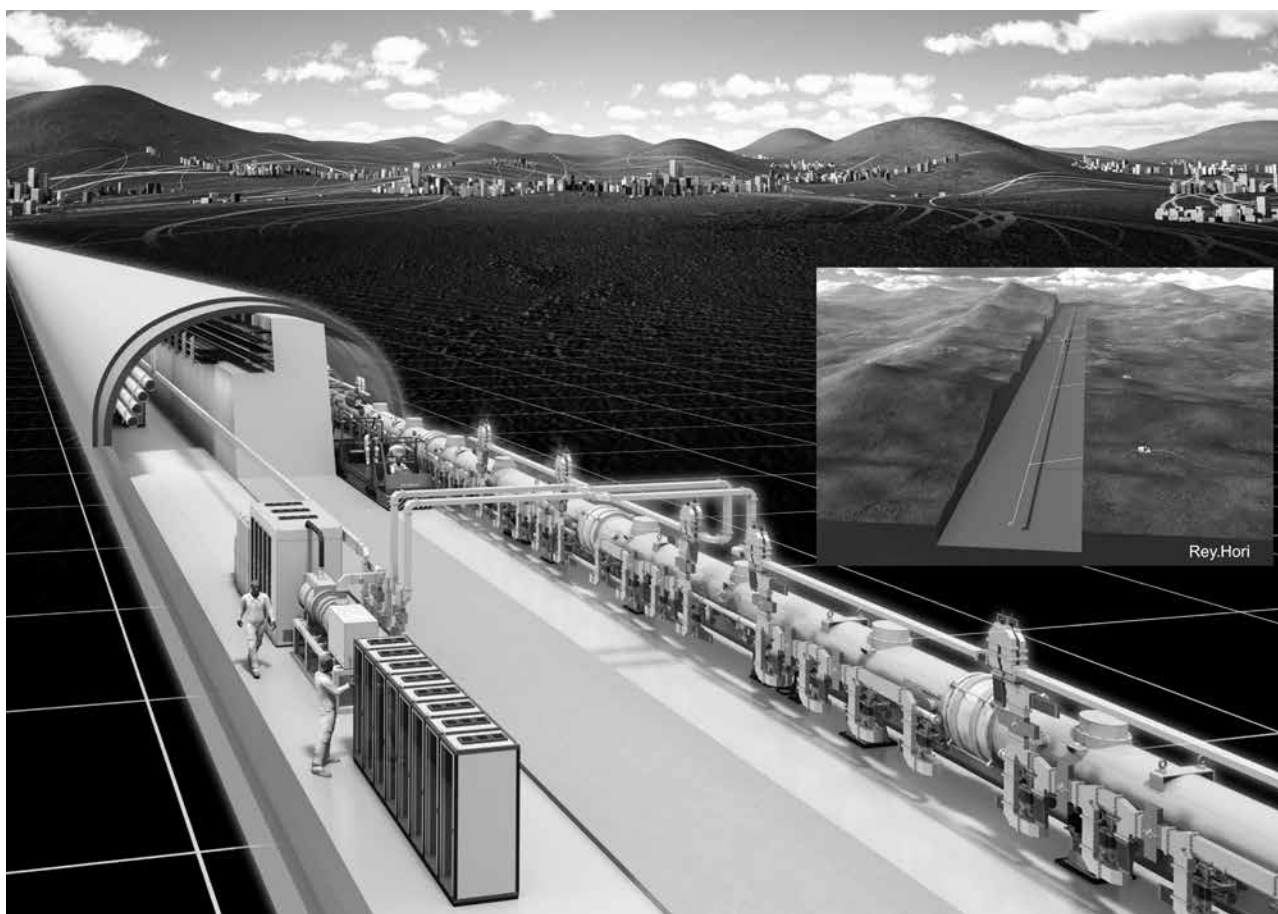
——最大で直線50kmの加速器というと、東京駅を拠点に東は成田、南は横須賀、西は八王子、北はつくば、までとすごく巨大な施設になりますね。

山下 大きさを世界にある加速器と比べると、スイスのセルンという

ILCステージング型（2016年末の国際会議を経て）



国際リニアコライダー・ILC計画の完成予想図



国際リニアコライダー・ILC計画の完成予想図

研究所にある円形の加速器は円周27kmで東京・山手線とほぼ同じ大きさになります。セルンというのは現在の物理学研究の世界的な拠点であり、この加速器で2012年に「ヒッグス粒子らしき素粒子」が発見されたことは大きなニュースになりました。しかし円形であるということは、加速させた粒子を曲げなければいけないわけで、せっかく粒子に与えたエネルギーが減ってしまう問題があります。その問題が直線型のILCではなくなり、十分な加速を与えられるだけの距離があり、エネルギーの低下も抑

えられるから、粒子に巨大なエネルギーを持たせたまま衝突させることができます。

——ひと口に“衝突させる”といっても、電子や陽電子はものすごく微少なものですよね。

山下 ILCの衝突の精度としてはナノメートル。ナノメートルというのは100万分の1メートルですから、ウイルスの100分の1くらいになります。その精度で極限速度である光速近くまで加速した電子と陽電子を衝突させるわけです。

——そしてその衝突で、ビッグバンの状態が再現できるわけですね。

山下 厳密に言う「宇宙創生のビッグバン直後である1兆分の1秒後の状態」が、1秒に1万回再現できることになります。これがILCで、完成すればもちろん世界でただ1つの加速器になります。そしてその研究により、ビッグバンの当時に宇宙を支配していた法則や素粒子を観測できることになります。

ILCはこれほどの精度が必要とされるので、振動が多い東京の地下であつたり、鉄道や高速道路

が近い場所でやろうとしてもとてもできるものではありません。そうした環境、地盤や地層の問題などさまざまな角度から検討して選ばれたのが東北の「北上山地の地下」なのです。

この建設場所について、もしかしたら東北復興の起爆剤のために、と思う方もいるかもしれませんが、はっきり申し上げておくと政治的意図は皆無です。候補地は東日本大震災が発生する以前から、のべ10年以上かけて30ヶ所以上あった候補地から研究を行うのに最も理想的な要件を諸々検討して絞り込まれてきました。その結果、最高の研究環境を作りうる場所として残ったのが東北・北上山地なのです。

素粒子とは？「宇宙の法則」を解き明かす研究

—— お話に出てきました「素粒子」という言葉は、近年ニュースなどでよく耳にするようになりました。山下先生の専門分野ですが「素粒子とは、物質を構成する最も基本的な最少の粒子」という認識でよろしいでしょうか。

山下 素粒子は、あくまで現時点ですが「これ以上小さくすることが出来ない単位」のものです。しかしそれだけでは説明は不十分で、素粒子は全ての変化も司っています。

例えば力が働くことであったり、摩擦であったり、磁力が発生した

りなど、あらゆる変化が素粒子で決まっています。というのが、宇宙の仕組みが素粒子と完全に1対1で対応しているのです。なので、よく素粒子の研究と言うと“物が何で出来ているのかを調べている”と思われがちですが、そうではなく「宇宙の法則を調べている」ということなのです。

—— 全ての物質は原子核があって周りを電子がまわっていて……ということですが、素粒子はそれよりさらに小さいもの、ということでしょうか。

山下 そういうことです。素粒子には「物質を作る素粒子」「力を伝える素粒子」「質量を与える素粒子」といったものがあると考えられています。

その中で、宇宙全体を決定づけてしまったような二大素粒子があって、ひとつが「ダークマター」、日本語で言うと「暗黒物質」というもの、もうひとつが「ヒッグス粒子」これは質量を与える特別な素粒子です。

—— 「ダークマター (暗黒物質)」とは何でしょうか。

山下 何かと言われると、実は全く分かっていません。銀河がまわっているスピードを調べると、そこには見えない物質がたくさんあるということが分かっているのです。物質がたくさんあるけれど、それが何であるかが明確に分からずダー

クマター (暗黒物質) と言われています。その候補はある素粒子と言われています。

—— そして宇宙の運命を決定づけたというもうひとつの素粒子が「ヒッグス粒子」ですね。ニュースなどでも話題になりましたが、簡単に教えていただけますか。

山下 ヒッグス粒子は特別な素粒子で、モノを作っている素粒子ではなくてあらゆる素粒子の「質量」を生み出す原因だと考えられています。実はヒッグス粒子は“神の素粒子”とも言われ、私たちの周りにあるのです。というよりも宇宙の全ての物質はヒッグス粒子にどっぷり浸かっています。私たちには何も見えていませんが、この世界はヒッグス粒子で埋め尽くされているのです。例えば海の中をイメージしてみてください。私たちが海の魚でヒッグス粒子という海の中にどっぷりと浸かって生きているようなものです。

—— ヒッグス粒子がないと、どうなるのでしょうか。

山下 ヒッグス粒子がなかったとしたら、全ての物質が質量を持たなくなります。どうなるかというと空中に浮いてしまうといったことだけでなく、全てが原子も何もなくバラバラになります。私たちの体も10億分の1秒で一瞬にしてバラバラになってしまいます。質量がなくなるということは全てのものが光のスピードになるということなので、そういうこ

とが起きるのです。ですから私たちが生きていられるのはヒッグス粒子があるおかげなのです。でも、ヒッグス粒子があまりにも身近にあったものだから、長年誰もその存在に気付かなかったのです。

実は、人間は本当に分からないことだらけの中で生きているのです。宇宙の法則はいまだ4%程しか分かっていませんし、人間はわずか4%程の宇宙の法則を使って生きていて、残り96%は何でできているのか…?何でそういう現象が起こるのか…?全く分かっていないのです。

加速器で“現代の錬金術”のようなことが可能に

— 加速器はどれくらいの長さがあれば、どんな素粒子が研究できる、という目安はあるのでしょうか。

山下 ヒッグス粒子の研究には240GeV（ギガ電子ボルト）のエネルギーが必要とされていて、これは直線で20kmの加速器で可能になると考えられています。すなわちILCのスタート時に予定されている長さです。次に直線23kmまで延ばすとトップクォークという素粒子も研究対象にできます。さらに直線30kmになると2つのヒッグス粒子を同時に生成して研究することができます。このような研究対象を見据えて、ILCも加速部を全長20km～50kmへ延長していこうという計画です。

先ほど話した「ダークマター（暗黒物質）」は、どのレベルのエネルギーで見つかるかは未知です。もしかしたら20kmの加速器で見つかるかもしれないし、どこで発見されるか分かっていません。

— ILCによって「ダークマターの素粒子発見」という世紀の大ニュースを耳にすることもあるかもしれないという期待が膨らみます。もちろんILCを使った研究で、身近な生活に活用されるテクノロジーも生み出されることにつながるわけですね。

山下 その可能性は無限に広がっていると思います。

人類史から素粒子の研究を位置づけると、より「モノの基本的なこと」を追求してきた流れの中にあります。人間が行ってきた最初のことは「モノとモノを組み合わせる」ことでした。それが化学の出現によって「分子を結合させる」段階に移りました。そのうち、モノには原子があることがわかり「原子を制御しよう」ということになりました。

そして今は原子核を制御する、あるいは原子を変換させてしまうところまでいっています。原子核を変換させると、そのモノの寿命が変えられることができます。

— 原子核を変換させるって、物質そのものを違うものにするということでしょうか。

山下 昔で言う錬金術なわけですよ。その錬金術のような原子核を変換することが加速器で出来るということです。理論的には以前からありまして、自然界でも似たような現象はあるのです。それをコントロールすることが加速器の発達で可能になってきます。

実は、インターネットは素粒子、加速器の研究が生んだスピンオフ

— 伺ってきた素粒子や加速器を使った研究の成果には、既に私たちの暮らしの中にも数多くあるのでしょうか。

山下 “素粒子”や“加速器”という言葉は遠いものかもしれませんが、その研究成果が日常生活の中に膨大に見られるのです。

大きく言うと、見えないものを見ようと進めてきた研究の分野と、その研究を進めるために世界が結ばれたことで生まれた派生技術の面と2つがあります。後者の代表的なものは、実は、今や誰もが毎日のように使っているインターネットです。

— えっ、インターネットが素粒子や加速器から生まれたのですか。

山下 意外に思いますよね。インターネットのURLに「www」の表記で見られるワールドワイドウェブ、それは素粒子の研究のために世界をつなぐ必要があって、ス

イスにある「セルン」という世界最大の素粒子研究所で、おおよとが開発されたものなのです。ここは世界のさまざまな国の科学者が共に素粒子を研究しようと1954年に設立されたわけですが、EUの前身であるECが出来るよりも前なのです。つまり物理の研究面では政治よりも先に国際協力が進んでいたわけです。

そして素粒子の研究というのは、常に最新の事象を対象に行う必要があるのです。いろんな国の研究者と一緒に、リアルタイムに双方向通信を行う必要があったわけです。そうした中で、アメリカがかつて軍事用に使っていた海底ケーブルを民間に開放するというようなこともあって、インターネットの基本のブラウザが生み出されたわけです。素粒子の研究のためにどうしても必要だから生まれた技術で、スイスのセルンにはその第1号機があるのです。

こうした素粒子研究を進める中で、スピノフで生まれた派生技術もあるわけです。

—— 山下先生は、インターネットを使った第1世代の一人、ということになるわけですね。さて、素粒子研究が進めたもう1つの面「見えないものを見る」という分野で生まれた成果では、どのようなものがあるのでしょうか。

山下 特に医療の分野では多数あり、最も身近なものがレントゲンです。レントゲンも体内の異常を

感知するセンサーに属するわけですが、医療用のセンサーは、音や温度によるセンサーを除けば、素粒子物理学から生まれたものがほぼ100%と言えます。新しい原理を開発して、今まで見えなかったものを可視化したり、イメージングしたり、電気信号に変えるとかを素粒子の研究は行ってきました。それをすぐに医療に応用してきたわけで、素粒子の研究と医療は親和性が最も高いと言えます。がんを診断するPET診断もその1つです。

また、最近リニア新幹線などでも話題になる「超伝導」も、大規模に初めて実用化したのはアメリカのフェルミ素粒子研究所という素粒子の分野なのです。

—— そうした革新技術を生みやすい状況が、素粒子研究にはあるのでしょうか。

山下 素粒子研究は、新しい技術をみんなで生み出さなければならぬ宿命のもとにあるとも言えます。

他の分野ではある現象を色んな人が色んな面から研究することで多様性を解明することにも重要性が置かれますが、素粒子は逆に、1つのものを世界の全員がみんなで追求する、数千人が同じ研究をやるわけです。わかりやすく言うと、1番にならないといけなわけですが、1人では出来ないから世界で協力する、という分野です。ですから、とてつもない技術が生まれうる分野が素粒子なのです。

—— ILCが東北・北上山地に完成すると、世界の素粒子研究の発信地が日本に代わるということですね。

山下 そうです。ILCによって、今世界の一大研究拠点になっているスイス・セルンのように、北上山地がそうなるわけです。これはすごいことで、世界の最先端の頭脳集団が東北・北上山地に集結するだけでなく、ひいては北上山地周辺に研究施設であったり、研究を応用して商品にする企業・団体などまでが拠点を置くようになるでしょう。そうすれば数万人規模の人々が集まる「科学の最先端拠点」となるでしょう。文字通りILCは、世界の未来と日本の未来を開く大プロジェクトと言っても過言ではありません。

—— 地震の心配はありませんか。

山下 日本全国の地層・地盤を調べた上で、もっとも安定した場所が北上山地でした。



宇宙の始まりのビッグバンを再現する！
そしてその研究に世界トップの頭脳集団が集結する
「世界一の知の拠点」になるのが ILC です。



超伝導加速器とナノメートルでのビーム制御技術



人類が背負う課題に 答えを与える大きな可能性

— ILCの研究成果が生むメリットとしては、どんなことがあるでしょうか。

山下 とても重要なことに「ADS核変換」というものがあります。これは、今、世界中で課題になっている原子力発電所などで発生する核廃棄物の処分に大きな活路を拓くものとして期待されています。

例えばプルトニウムであれば放射能の半減期が2万4000年ほどもあり、処理の方法として地下に埋設して厳重に保管することが議論をされていますが、さまざまな懸念材料をクリアできて

いない現状があります。このADS核変換はそんな物質の寿命をなんと100分の1に変換しようというものなのです。

— それは原子核を変換させることで、可能になると考えられているのでしょうか。

山下 核廃棄物に加速器で大強度の陽子で生成された中性子を照射することで、未臨界で核変換（元素変換）を起こし、100分の1に短寿命化することが考えられています。

原子力発電を日本国内でこれからどうしていくかにはさまざまな議論があると思いますが、それとは別に世界に目を向けると原子力発電などの核廃棄物は増えていく現実があります。これをどうにかしないと

いけないのは全世界の課題です。

例えば核廃棄物を数万年保存するとなると、その数万年に耐える構造体をどう製造するのかなどの問題がありますが、数百年になると現実的に可能な方法を検討する道筋が見えてくることになるのです。

もちろんILCの技術の応用先は、他にも医療の分野や半導体、宇宙開発など、数え切れないほどの分野におよぶことは間違いありません。しかし重要な応用先のひとつとして世界が課題としている核変換による核廃棄物の短寿命化があげられると考えています。

次号「科学の峰々」では、引き続き山下了先生に日本発・世界の物理学を牽引する世紀のプロジェクト国際ニアコライダー・ILC（下）をお話いただきます。