

Muon collider gains momentum

ミュオンコライダーをめざして

Eric Hand

Nature Vol. 462(260-261)/19 November 2009

フェルミ研究所は、今後も物理学の最先端を走り続けるために、まだ実証されていない技術に望みを託そうとしている。

スイスのジュネーブ郊外にあるヨーロッパ素粒子物理学研究所 (CERN) で、大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) の地下リングを陽子ビームが再び駆け巡り始めたのは、つい最近のことである。ところが物理学者たちは、早くもいくつかのチームに分かれて LHC の後継加速器のデザインを競い合っている。2009 年 11 月の上旬には、米国の科学者たちが大胆な計画を表明した。世界初の「ミュオンコライダー」の建造である。

コライダー (衝突型加速器) については、以前から準備されている計画が 2 つある。いずれも、長く、まっすぐなトンネルを通過して加速された電子と陽電子を衝突させようとするリニアコライダーである。しかし、米国イリノイ州バタヴィアのフェルミ国立加速器研究所 (フェルミ研究所) の一部の物理学者たちは、こうしたリニアコライダーの費用と実現可能性に不安を感じ、LHC 以上に物理学の限界を押し広げることができるかどうかも疑っている。彼らが

その代わりに推しているのが、電子の約 200 倍の重さをもつミュオンを衝突させるミュオンコライダーである。

フェルミ研究所は、2009 年 11 月 10 日から 12 日にかけてミュオンコライダーに関するワークショップを開催した。フェルミ研究所の所長である Pier Oddone は、「問題は、それを建造できるかどうかです」と語った。この会合は、1990 年代の中ごろに最初に提案されてから長く冬眠状態にあったアプローチの復活に向けて、重要な第一歩になるとみられている。これにより、ミュオンコライダーは、先行する 2 つの加速器計画と直接競合することになる。その 2 つとは、米国、欧州、アジアで分割して設計される全長 31 キロメートルの「国際リニアコライダー (ILC)」、そして既に LHC をもつ CERN が計画している全長 48 キロメートルの「コンパクトリニアコライダー (CLIC)」である。

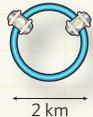
ミュオンコライダーの研究開発にはたいへんな困難が予想されるが、これが実現すれば、電子コライダーよりも優れている点が多くあると考えられている。例えば、ミュオンは電子に比べて重く、標的が広がるため、正面衝突しやすくなる。また、ミュオンコライダーがヒッグス粒子 (粒子に質量を与える機構の 1 つと考えられているが、まだ観測されていない粒子) を生成する能力は非常に高いと期待されており、ときに「ヒッグスファクトリー (ヒッグス粒子工場)」とよばれることもある。ただし、ミュオンの寿命は典型的には



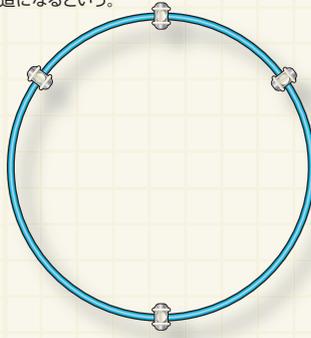
フェルミ研究所 (上) は、これからも物理学の最先端を走り続けるために、ミュオンコライダーの建造をめざしている。

大きさがすべてではない

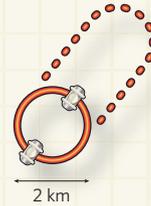
素粒子物理学の分野では、大型のコライダーほど高エネルギーでの衝突が可能になるが、その分、コストも高くなる傾向がある。しかし、ミューオンコライダーは、小さい設置面積と比較的低いコストで、高エネルギーでの衝突を可能にする。図中の5つの加速器のうち4つについて主要な技術的構成要素の数の見積もりを行った、フェルミ研究所の物理学者 Vladimir Shiltsev によれば、ミューオンコライダーは、ほかの計画中の加速器に比べて単純な構造になるという。



テバトロン
1985年～現在
加速粒子：陽子
エネルギー：1TeV



大型ハドロン衝突型加速器 (LHC)
最初のビーム衝突：2009年
加速粒子：陽子
費用：46億ドル
エネルギー：14TeV
構成要素の数：11,000



ミューオンコライダー
計画中
加速粒子：ミューオン
費用：不明
エネルギーレベル：3TeV
構成要素の数：10,000

コンパクトリニアコライダー (CLIC)
計画中
加速粒子：電子
費用：2010年中に見積もり
エネルギーレベル：3TeV
構成要素の数：260,000



国際リニアコライダー (ILC)
計画中
加速粒子：電子
費用：2007年に80億ドル
エネルギーレベル：0.5TeV
構成要素の数：38,000

2.2 マイクロ秒であるため、ミューオンを光速に近いスピードまで急激に加速し、一般相対性理論の時間の伸びの効果を利用して、寿命を引き伸ばす必要がある。

ミューオンは、磁場をかけて円形加速器の中で加速してもエネルギーを失いにくいので、比較的小さな（ゆえに安価な）リングで光速に近い速度まで加速することができる。一方、電子を円形加速器で加速する場合、これよりはるかに多くのエネルギーがX線の形で放射する（この光はシンクロトロン放射とよばれ、しばしば結晶学に利用される）。

数百ギガ電子ボルト（1ギガ電子ボルトは 10^9 電子ボルト）以上のエネルギーを達成する必要がある電子加速器では、電子の運動をまっすぐに保つことでシンクロトロン放射によるエネルギー損失を小さくすることができる。けれどもそのためには、より大規模で、より高価なコライダーが必要となる（上に示した図参照）。円形コライダーには、衝突率が高いという長所もある。粒子が加速器の中を何周も回

るため、標的に衝突する機会が複数回与えられるからである。これに対して、線形コライダーの中の電子は、近づいてくる陽電子と衝突する機会が1回しかないため、ビームの位置を厳密に調節することが非常に重要となる。

ロビー運動

Oddone は、つい数年前まで ILC（国際リニアコライダー）のためのロビー運動に奔走していたが（Nature 2005年6月9日号728ページ参照）、今ではミューオンコライダーの推進派になっている。理由の1つは、ミューオンコライダーが小さく、フェルミ研究所のキャンパスにすっぽり入るからである。フェルミ研究所には、現時点で世界最高エネルギーの粒子加速器テバトロンがあるが、LHCがその目標とする14テラ電子ボルト（1テラ電子ボルトは 10^{12} 電子ボルト）を達成すれば、トップの座から陥落する。一方で、フェルミ研究所は、まもなく独自にミューオンを生成できるようになる予定がある。あと1年か

2年でテバトロンの運用が終了したら、「プロジェクトX」を開始することになっているのだ。その強力な陽子ビームは、当初はニュートリノの研究に用いることになるが、ミューオンの生成に利用することもできる。Oddoneによれば、段階的にミューオンコライダーの実現をめざすプログラムは、すべてを一気に完成させようとするプログラムよりも理にかなっているという。

フェルミ研究所は、国家レベルのミューオン加速器プロジェクトを組織することと、ミューオンコライダー研究のための補助金を年間900万ドルから1500万ドルまで増額することを米国エネルギー省に要請した。2009年10月22日にワシントンDCで開かれた高エネルギー物理学諮問会議では、米国エネルギー省科学局の局長 William Brinkman が、ILCが棚上げになった原因は、そのコストの高さにあったと指摘した。彼は、フェルミ研究所がミューオンコライダーのアイデアを進めていくことを望んでいる。「真の革新が期待できる方向をめざすのは、よいことです」。

ミュオンコライダー推進派でも、ミュオンコライダーの計画が ILC や CLIC の計画に大きく遅れをとっており、これらに追いつき、互角に渡り合えるようになるまでにはたいへんな努力をしなければならないことを認めている。Oddone は、次世代のコライダーが新しい物理学を生み出すために必要とされるエネルギーを LHC が明らかにする 2012 年までに、より詳細なデザインコンセプトを固めたいと考えている。

一方、ILC 計画のリーダーであるカリフォルニア工科大学（米国パサデナ）の名誉教授 Barry Barish は、ミュオンコライダーの推進派は、その技術が実際にうまくいくことを証明する必要があると指摘する。「フェルミ研究所の所長は、ミュオンコライダーの実現をめざしてロビー運動を繰り返していますが、だからといって、米国以外の国々でその可能性がまじめに受けとられているということにはなりません」と Barish。

泣きどころは費用

ILC は、かつては次世代コライダーのデザインの中で明らかに優位に立っていたが、この 2 年間は苦戦を強いられてきた。ILC は、急速に成熟してきた超伝導加速技術を誇り、その実現に向けて積極的なスケジュールが立てられていた。しかし、2007 年の末に米国と英国で ILC 関係の予算が削減された結果、その研究は事実上終わりを告げた（*Nature* 2008 年 1 月 10 日号 112 ページ参照）。

米国カリフォルニア州のローレンス・バークレー国立研究所に所属してヨーロッパの LHC 計画に取り組んでいる物理学者の Robert Cahn は、ILC が抱えている最大の問題は 200 億ドルの値札であると指摘する。ILC が建造される可能性について、彼はざっくりとだけ言及する。「ILC はもうおしまいですよ」。

Barish は、現在提案されているプロジェクトの中で ILC が最もよく練られていることには変わりはなく、実際のコストは、エネ

ルギー省が数十年前の価格を参照してはじき出した 200 億ドルという数字よりも、2007 年に提出された 80 億ドルという見積もりに近いだろうという。彼はまた、チームはデザインの変更を考えていて、これによりコストを 15% 削減できると付け加えた。

とはいえ Barish も、LHC がこれから出す結果次第では、ILC の建造をあきらめざるをえない事態になりうるとは認めている。ILC の目標エネルギーは 500 ギガ電子ボルトで、もっと高いエネルギー領域を探る必要があることが明らかになった場合、スケールアップは困難であるからだ。より高いエネルギーを達成するためには、ILC をもっと大きくする必要がある。そのためには、さらなる超伝導空洞とトンネル掘削が必要であり、莫大な額の追加出費が必要になるからだ。

ILC で問題となるエネルギーの限界を、CLIC（コンパクトリアコライダー）は巧妙な方法で回避する。CLIC は ILC のような超伝導空洞は使用せず、従来型の磁石を、2 本のビームトンネルで使用する。第一のトンネル内でビームを加速したら、技師が急ブレーキをかけてエネルギーを吸い上げ、第二のトンネル内の電子ビームにそれを移すのだ。CERN で CLIC の研究チームを率いる Jean-Pierre Delahaye は、今年中にデザインの検討を終える予定なので、それまではプロジェクトの費用を見積もることはできないという。けれども、CLIC が目標とするエネルギーレベルは ILC のピークエネルギーの 6 倍に相当する 3 テラ電子ボルトであり、そのトンネルは ILC より 20 キロメートル近く長くなる予定であるため、費用は ILC よりはるかに高額になると見られている。また、CLIC は 440 メガワットという莫大な電力を必要とする。これは、小型の原子力発電所 1 基分の出力に相当し、CERN に供給されている電力を大幅に上回る。

3 つのデザインコンセプトの運命は、発見のために LHC がどのくらいのエネルギーを必要とするかによって決まってくる。

多くの理論家は、超対称性（「量子の動物園」にいる粒子の数を倍増させる理論）から新しい高エネルギー粒子が現れてくると予想している。LHC がこれらを 1 つも見つけられなかった場合、ILC の比較的低いエネルギーではおもしろいものは大して見つからない可能性が高まり、ミュオンコライダーを建造しようとするフェルミ研究所が有利になる。

ミュオンコライダーの研究開発の先頭に立つフェルミ研究所の Steve Geer は、低エネルギーの超対称性粒子を除外する実験から、間接的な証拠は既に得られているという。「いずれも、新しい物理学のためのエネルギースケールがより高いところにあることを示唆しています」。

ミュオンコライダーで到達できるエネルギーは 3 テラ電子ボルトにすぎないが、LHC では手の届かない領域の世界を探ることができる。LHC が陽子を衝突させるエネルギーははるかに高いが、陽子はクォークという小さい粒子からできているため、衝突はずっと汚く、電子またはミュオンを衝突させるコライダーと比べると有効エネルギーが 1/10 になってしまうからである。

フェルミ研究所の MuCool（ミュオンイオン化冷却研究開発）実験のスプークスマンである物理学者 Alan Bross らは楽観的だが、まずはミュオンコライダーに関して最もやっかいな問題を解決しなければならない。MuCool 実験は、加速しようとするミュオンが崩壊してしまう前に、高温のミュオンの雲を整列させ、低温の細いビームとして進ませる方法を見いだそうとしている。

Delahaye は、ライバルたちがミュオンの研究を行うことを歓迎しているが、ミュオンコライダーの有効性を実証できるようになるまでには長い時間を要するかもしれないという。彼自身、実に 1986 年から CLIC に取り組んできたのだ。「（ミュオンコライダーのほうか）単純で安価であるという結論に飛びつくのは軽率です」。（三枝小夜子 訳）