

## 解説

## SSC 計画：現状とその物理の魅力

近藤敬比古 &lt;高エネルギー物理学研究所 350 茨城県つくば市大穂 1-1&gt;

SSC(Superconducting Super Collider) は重心系エネルギー 40 TeV の陽子・陽子コライダー加速器で米国テキサス州で建設が始まっている。SSCの主要目的は、1 TeV エネルギー領域の物理、とりわけ GWS 理論（弱電磁相互作用の対称性の破れ）の起源を解明することである。既に大型実験装置の予備提案 (SDC) が一つ認められた。巨大科学の典型として、また大型国際協力の 1 例として議論になっているこの計画の経過と現状、加速器、実験装置、期待される物理について、欧州での LHC 計画との比較も含めて概説する。

## 1. はじめに

素粒子物理学では10年以上も前から 1 TeV のエネルギー領域が物質の究極的構造とそれを支配する基本法則の解明に決定的であることが指摘されてきた。過去 5 年間に完成した大型加速器のテバトロン、トリスタン、SLC、LEP を使った全ての実験結果も「標準理論」が完璧に正しいことを証明してきた。ところがこの標準理論の主要部分である Glashow-Weinberg-Salam (GWS) 理論（弱電磁相互作用の対称性の破れ）の根源がまだ全く明らかではない。その鍵が 1 TeV エネルギー領域に眠っていると殆ど全ての素粒子理論屋が一致して指摘しているのである。

現在のところ実用にできる加速器技術でこの TeV 領域を探る手段は、陽子ビーム同士を衝突させる陽子・陽子コライダー型のみである。SSC のエネルギー (40 TeV) とルミノシティ（輝度、 $10^{33}/\text{cm}^2/\text{s}$ ）はこの有望なエネルギー領域を探究するために設定され、1999年の完成を目指して建設が開始された。加速器は現存のテバトロンの周長で14倍、エネルギーで22倍と史上最大の規模となる。物理現象を観測する測定器も1秒間に1億個の陽子・陽子散乱を相手にするため、複雑でかつハイテク技術を駆使した巨大な装置となる。

## 2. SSC の経過と現状

1970年代後半、ICFA (国際未来加速器委員会) 主催で開かれた一連の研究会で将来の超大型高エネルギー加速器案が幾つか出され、陽子・陽子コライダーもその可能性の一つに上げられた。その後 Fermilab での超伝導電磁石を使ったテバトロンの成功に刺激されて、1982年夏のシンポジウムにて SSC の原案が出された。1984年に DOE (米国エネ

ルギー省) は SSC-CDG (Central Design Group) を設立し、M. Tigner 所長のもとに設計と超伝導電磁石の R & D が進められた。1986年3月には概念設計案が DOE に提出され、1987年1月にレーガン大統領が SSC の建設を宣言した。

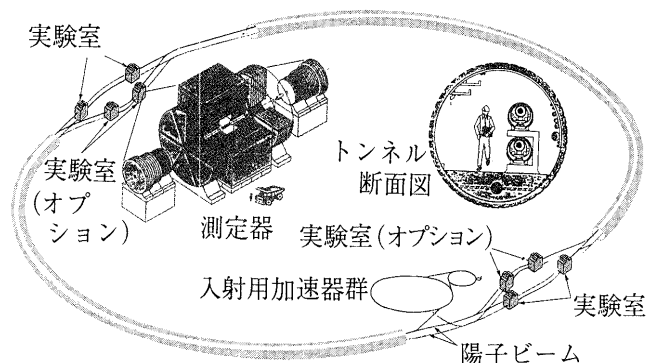
SSC の建設場所は、43箇所の立候補地から産業、交通、地域社会、地質などに渡る調査検討の結果、テキサス州ダラス近郊に88年11月最終決定した。SSC 研究所は89年1月に発足し、R. Schwitters 氏が所長に任命された。研究所は加速器の建設を担当する一方、実験をするために全世界から集まる研究者に研究の機会を提供するのが目的で設立されたものである。91年4月現在 1,260 人の所員を擁して加速器、実験施設等の詳細設計を行っている。90年7月には建設地での最初の土地買収が行なわれ、10月にはコライダー用超伝導双極電磁石の担当会社 2 社が選定された。

一方実験装置は大型かつ複雑でその建設には加速器と同じ位の期間がかかる。90年5月には実験提案の予備募集締切があり、13のグループが色々なアイデアを提案した。さらに90年11月には、加速器完成とともに始まる大型 high  $P_1$  実験の予備提案 (Letter of Intent, LoI) の締切があり、3つの国際チームが応募した (表 1)。実験審査委員会は12月に開かれ、SDC 提案が本格的設計に取りかかることを認

表 1 大型 high  $P_1$  実験の提案 (Letter of Intent)。

グループ名	代表者	参加国名	参加人員
SDC	G. Trilling (LBL)	米, 日, ソ連, 加, 英, 伊, 加, 仏, 中...	675 名
L*	S. Ting (MIT)	米, ソ連, 中, 瑞西, 伊, 独, 仏, 中, 韓...	1101 名
EMPACT/ Texas	M. Marx (Stony Brook)	米, ソ連...	342 名

図1 SSC 加速器, 測定器, トンネルの概念図.



めた。日本グループはこのSDCグループに参加している。

SSCの建設費は1986年に行なった概念設計に基づく見積りで約59億ドルだった。SSC研究所が充足するとすぐテキサス州の現地に合った本番設計を始めた。またそれまでの超伝導電磁石の開発結果とテバトロン、HERAでの経験に基づき技術上の安全性を設計に加味した。主な設計変更点は、入射エネルギーを2 TeVに上げ、超伝導電磁石の口径を4 cmから5 cmにし、より強いビーム収斂を採用したことである。1990年にDOEは3つの委員会を充足させて独立なコスト見積りを行ない、それをまとめて1991年1月に83頁のコストとスケジュールの報告書を提出した。<sup>1)</sup> 全建設費の見積りは82億ドルである。これは86年のそれを大幅に越えるので、一時加速器エネルギーを下げた縮小案が真剣に議論された。最高到達エネルギーは目的の物理と深く関係する。ヒッグス機構の原因ないし手掛かりがどのエネルギーに潜んでいるか分からないとき、その全ての可能性を落とさず答えを出すには、40 TeVのエネルギーが最低限必要である。従ってエネルギーを下げる縮小案の採用は、物理上新しいことが何も見つからないという最悪の結果を生む可能性があることになる。また後述のLHCに対する物理上の優位性も小さくなってしまふ。本来の計画どおり最高エネルギーを40 TeVに保って建設を進めることが90年1月に決定された。<sup>2)</sup> なお実験装置の費用のうち外国に期待する部分(約4億ドル)は82億ドルに含まれていない。加速器建設費の約1/3を非連邦予算すなわちテキサス州と外国に期待している。

表2 SSC 加速器の主要パラメータ.

加速器タイプ	陽子・陽子衝突型加速器
ビームエネルギー	20 TeV (TeV=1兆電子ボルト)
ルミノシティ	$10^{33}/\text{cm}^2/\text{s}$ 以上
入射エネルギー	2 TeV
主リング周長	87.12 km
超伝導双極電磁石	8,652台 (MR), 432台 (HEB)
口径, 磁場	50 mm, 6.55 T at 4.35 K
超伝導四重極電磁石	2,024台 (MR), 278台 (HEB)
陽子数	$0.75 \times 10^{10}/\text{バンチ}$
バンチ間隔	5 m (16 ns)
衝突点でのビームサイズ	$5 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m} \times 7 \text{cm}$ (rms)
蓄積時間, 1 サイクル	30分, 24時間
入射システム	(エネルギー 周長 サイクル)
線形加速器 (H <sup>-</sup> )	1.22 GeV/c 148 m 10 Hz
低エネルギーブースター	12 GeV/c 540 m 10 Hz
中間エネルギーブースター	200 GeV/c 3.96 km 3s
高エネルギーブースター	2 TeV/c 10.9 km 2 min
低温設備	10プラント
冷却能力	54.3 kW (4.15 K) 97 kW (20 K) 660 kW (84 K)

SSCと同様な物理をめざす加速器計画に欧州でのLHC (Large Hadron Collider)がある。<sup>3)</sup> これはCERNにある現存のLEP加速器のトンネル内に、15.4 TeVの陽子・陽子コライダーを設置する計画である。1992年に計画のスタートをし、1998年の完成を目指している。

### 3. SSC 加速器<sup>4)</sup>

SSCでは周長87.1 kmの長円形で平均深度60 m、径3.6 mの地下トンネルの中に二つの20 TeV陽子貯蔵リングが設定され、二つのビームが衝突点で交差して陽子・陽子衝突が実現される。表2にSSC加速器の主要パラメータを掲げた。最高衝突エネルギーは重心系で40 TeVである。ルミノシティは $10^{33}/\text{cm}^2/\text{s}$ であるが、その10倍の輝度も実現可能である。

図1にSSCの全体の概念図を示す。衝突点は4箇所に設けられ、他の衝突点からの前方に出るミュオンを避けるため互いに直線上に位置しないように配置されている。入射用加速器群は、線形加速器と三つのシンクロトロンより構成されている。このうち高エネルギーと中間エネルギーブースターは遅いビーム取り出しが可能で取り出しラインは同一線上に並んでおり、どちらもテストビームとして使えるように工夫されている。高エネルギーブースターも超伝導電磁石を使い、1リングで陽子を双方向にも回せる様にバイポーラー型になっている。

超伝導電磁石の利用はSSC計画にとって不可欠である。通常の鉄と銅で作る電磁石の3倍高い磁場を発生でき、それだけ加速器のサイズを小さくできる。同時に運転電力の節約にも役立ち、常伝導電磁石を用いたならば4,000 MW必要なところ超伝導利用で30 MWで済む。超伝導電磁石のシンクロトロン加速器における大規模利用としては、Fermilabで1985年からテバトロンに4.4テスラの6 m長電磁石が774台、DESY研究所のHERA(建設中)では4.7テスラの8.8 m長電磁石が416台使われている。SSCの規模はそれらの10倍以上である。

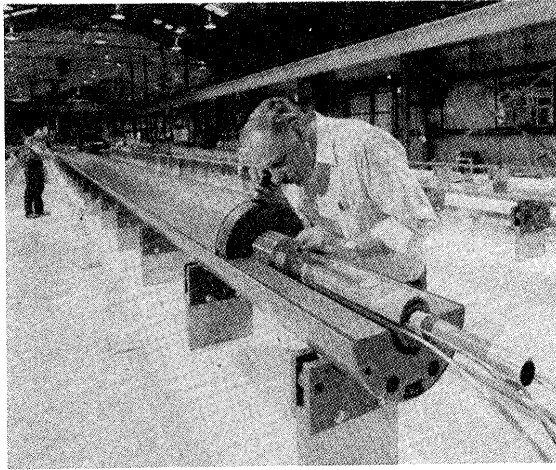


図2 試作用超伝導双極電磁石 (17 m 長) の組み立て風景.

SSC用超伝導双極電磁石は最高磁場が6.6テスラで、15 m 長と13 m 長の2種類が計8,652台設置される。図2にその試作品の組立の様子を示す。この超伝導双極電磁石の開発は急ピッチで進められているが、加速器から要請される厳しい磁場特性を50回以上の熱サイクル、100回以上のクエンチ、2万回以上の磁場サイクルの後でも維持出来ること、最低25年使用可能であること、信頼性の向上、大量生産、費用の最適化など解決すべき問題は並大抵ではない。既に25台の試作(但し改訂前のデザイン)がなされており、目標の6.6テスラ以上の磁場が達成されている。長さは短いが口径を5 cm にした最終デザインの試作も、まず90年9月に高エネ研で、12月にBNL, Fermilab で製造とテストに成功している。

超伝導コイルは、NbTi合金の細いフィラメントを安定化用銅に数千本埋め込んで線材とし、それを約30本撚線したケーブルを用いて製造される。線材の性能向上が開発研究を通じて行なわれ、最大許容電流密度  $J_c$  が要求仕様の4.2 K で  $2,750 \text{ A/mm}^2$  を十分越えている。ビーム入射時の低磁場では超伝導ケーブルの永久渦電流による6極成分が無視できない。この効果はNbTi合金フィラメントの径と入射エネルギーに依存する。そのため入射エネルギーを2 TeV と高く設定する一方、直径  $6 \mu\text{m}$  さらには  $2\sim 3 \mu\text{m}$  のフィラメントを開発中である。

超伝導電磁石の生産は民間会社が請け負う。生産ピーク時には1日あたり10台の生産率が要求されるので大規模な生産設備がいる。90年10月にコライダー用双極電磁石の生産担当会社として General Dynamics 社(正)と Westinghouse 社(副)が選定された。両者で計587個の電磁石を1994年6月までに生産し、量産化の技術を修得する。また超伝導線材メーカーも日本の2社を含む7社が候補として選定された。コライダー用超伝導四重極電磁石の入札も終り Babcock & Wilcox 社が選ばれた。

周長87kmのSSCリングに付随する設備も大規模なもの

になる。超伝導電磁石を4.35 K に低温維持するために、8 km おきに計10台の6.5 kW ヘリウム液化プラントが地上に設置される。液体ヘリウムの総量は230万リットルに達する。

SSCの運転形態としては、まず約17,000個の陽子バンチをコライダーに入射蓄積加速するのに30分かかる。ルミノシティは衝突実験開始後しばらく増えるが、約1日後には減り始めるので、ビームを捨て新しく入射をする。1年で  $10^7$  秒の実質運転時間を予想し、従って積算ルミノシティは  $10^{40}/\text{cm}^2/\text{年}$  である。

実験開始後暫くすると積算ルミノシティが物理到達限界を決めるので、時間とともにルミノシティの向上と実験装置の改善や更新が必要となる。SSCはそれらの可能性を考慮に入れてある。その一つは図1にあるようにバイパスビーム路を建設し、加速器運転中にも測定器の主要修理ができるようにすると同時に、新しい衝突点実験室を設置し、次世代の実験装置が入れるようにしてある。他方、加速器の目標ルミノシティ  $10^{33}/\text{cm}^2/\text{s}$  は、汎用測定器の限界とバンチ衝突あたり約1回の陽子・陽子散乱頻度を目安に設定されたもので加速器の限界ではない。ルミノシティを10倍にする方法は幾つかあるが、増加する陽子ビームからのシンクロトロン放射熱を吸収するため低温設備の能力増強が必要となる。図3に示すように、ルミノシティの限界は相手ビームとの相互作用とシンクロトロン放射で決まり、ビームエネルギー20 TeV で  $10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$  を越えることが可能である。

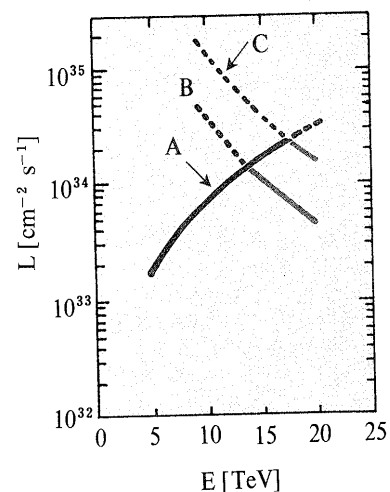


図3 SSCのルミノシティの限界値。Aはビーム・ビーム相互作用による限界、B、Cはシンクロトロン放射熱による限界でそれぞれ1 m あたり0.1 W と0.4 W に相当する。

図4 SSCで到達できる色々な物理反応のエネルギー/質量の領域。ルミノシティは  $10^{33}/\text{cm}^2/\text{s}$  とした。

#### 4. SSC のめざす物理

加速器実験による素粒子物理では、到達出来るエネルギー領域を飛躍的に伸ばした場合、全く予期しなかった新しい物理を発見することが過去しばしばあった。SSCは現存加速器の22倍のエネルギーを実現するので、その可能性は十分高い。しかしSSCでの物理は、現在の素粒子物理の描像からある程度の予測ができ、次の3種類に分類できる。<sup>2,5)</sup>

- 1) 軽い質量の粒子に関する物理、
- 2) 高い横運動量  $P_T$  の物理と重い新粒子の探索、
- 3) 弱電磁相互作用の対称性の破れの起源の探索。

まだ発見されていないが必ず存在するトップ (t) クォークの発見と研究、bクォークに関するCPの破れ等の研究、W, Zボゾンに関する研究などはこの第1部類に入る。これらの粒子の質量はビームエネルギーに比べて十分軽いので沢山生成される。さほど高いルミノシティは必要ない。SSC完成時に既存加速器を使って調べ尽くされているかも知れないし、LHCでも同様の物理が可能である。

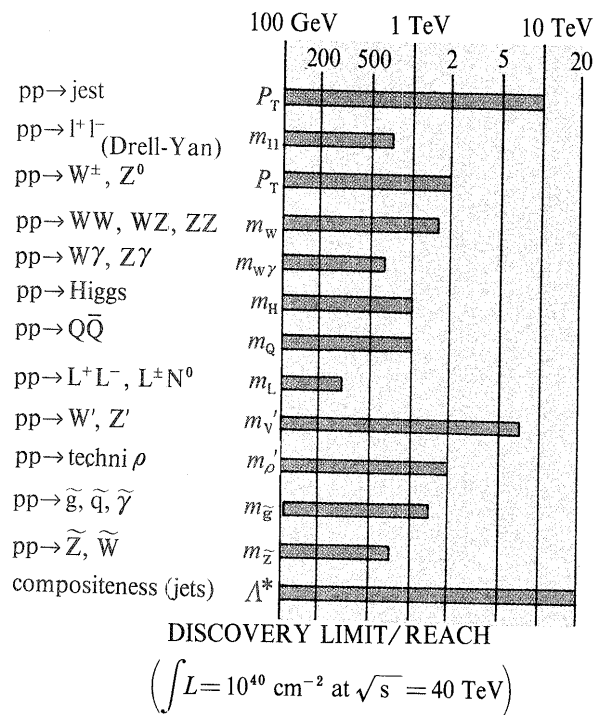
第2部類に入るものとしては、高い  $Q^2$  でのQCD (量子色力学) の研究、クォークやレプトンの内部構造の探究、重い新しいクォークやゲージボゾン ( $W'$ ,  $Z'$ )、超対称性 (SUSY) 粒子の探索などが挙げられる。これらの物理のためにはエネルギーは高いほど良いので、SSCは最も有利である。しかしながらこれら内部構造や新粒子は、現在の素粒子理論にとって必ず無くてはならないと言う必然性はなく、実際 TeV エネルギー領域に無いのかも知れない。

SSCの主要な目的は、第3部類の弱電磁相互作用の対称性の破れの起源を解明することである。SSCのエネルギーとルミノシティは、この目的を達成すべく設定されている。次章でやや詳しくこれを述べる。

SSCの標準輝度  $10^{33}/\text{cm}^2/\text{s}$  で1年運転して到達できるエネルギーもしくは質量の範囲を、可能な物理プロセス毎にプロットしたのが図4である。現存の加速器では到達エネルギー/質量が100 GeVそこそこ (図の左端) であるから、いかにSSCが広い未知の領域をカバーするかが分かる。

#### 5. 自発的対称性の破れ (ヒッグス機構)

電磁相互作用と弱い相互作用を統一したGWS理論は、理論の繰り込み可能性を保ちながら、弱い相互作用を媒介するW, Zボゾンの質量が重いことを説明するヒッグス機構を根本としている。この機構とは、基本方程式は  $SU(2) \times U(1)$  のゲージ変換に対して対称であるが、現実世界に



はその対称性が失われる現象、すなわち自発的対称性の破れである。固体物理学や統計物理学では相転移と呼ばれる現象である。この現象が起こるのは負の質量項 ( $\mu^2 < 0$ ) をもつスカラーのヒッグス場  $\Phi$  が存在するためである。ヒッグス場  $\Phi$  を記述するラグランジュアン密度は

$$\begin{aligned}
 L_\phi &= |D_\mu \Phi|^2 - \mu^2 |\Phi|^2 - \lambda |\Phi|^4 \\
 &= 1/2 (\partial H)^2 + M_W^2 W^+ W^- \\
 &\quad + 1/2 M_Z^2 Z Z - \lambda (|\Phi|^2 - V/\sqrt{2})^2 + \dots
 \end{aligned}$$

と書ける。ここで  $D_\mu$  は共変微分、 $V/\sqrt{2}$  は  $\Phi$  の真空期待値、 $H$  はその周りで展開した  $\Phi$  の物理的ヒッグス場、 $V = \sqrt{-\mu^2/\lambda}$  はフェルミ定数  $G_F$  と関係づけられて 246 GeV である。こうして、質量ゼロの光子と三つの重いゲージボゾン ( $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$ )、少なくとも1個のスカラー・ヒッグス粒子が現われる。このうちW, Zボゾンは予言通り発見され、ヒッグス粒子のみが未だに発見されていない。またクォークとレプトンの質量の起源も、この自発的対称性の破れの導入で同時に説明できる。

GWS理論は1972年以来、CERNでの中性カレント発見、ニュートリノ散乱、SLACでの偏極電子重水素散乱、CERNでのW, Zボゾン発見、トリスタンでの  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  前後方非対称性などの一連の実験事実に加えて、最近のLEPでの実験でも厳密に正しいことが証明された。このようにGWS理論は実験事実を全て見事に説明するのだが、その根本を謎のヒッグス機構に依っている。本当にヒッグス粒子は存在するのか？ その起源は？ 現在全く手がかりがない。ただエネルギーの目安として真空期待値 246 GeV が分かっているだけである。さらに標準理論は、 $\sin^2 \theta_w$ 、世代数、クォーク、レプトンの質量など理論の枠内で決定で

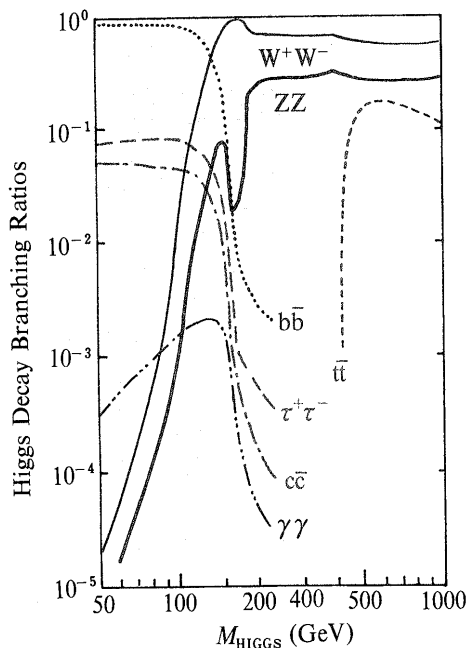


図5 ヒッグス粒子の分岐比. トップクォークの質量を 200 GeV と仮定している. (Z. Kunszt 他より引用.)

きない任意パラメーターを20近く内蔵する不完全なものである。それなのに実験事実と完璧に一致する。必ずその背後により高度の法則、対称性、あるいは次の階層が控えている筈である。ヒッグス粒子の発見あるいはその否定など、自発的対称性の破れの実験的解明が素粒子物理の鍵を握る最重要課題である所以である。

ヒッグス粒子の質量  $M_H$  は上記のラグランジュアンから

$$M_H = \sqrt{2\lambda} V = 347\sqrt{\lambda} \text{ GeV}$$

で与えられるが、この新しい力の結合定数  $\lambda$  の値は低エネルギーの実験情報からではわからない。LEPの実験で  $M_H$  は 53 GeV 以下ではないことが判明している。またヒッグス粒子については色々の理論予想がいっぱいある。例えば

- 1) 1個しかなければ  $M_H < 700 \text{ GeV}$  である,
- 2) 大統一理論が成り立てば  $M_H < 200 \text{ GeV}$  である,
- 3) SUSY理論や超弦理論では複数個(中性, 荷電)ある,
- 4) テクニカラー理論に基づくテクニ粒子の対凝縮である,
- 5) 異常に重いトップクォークの対凝縮である,
- 6) ヒッグス粒子は無い, ……

等々。理論的には、ヒッグス粒子が単独で存在し他に何も無いという事態は難しいことが一般的に言える。スカラー粒子の自己質量補正を計算すると、補正された質量を 1 TeV 以下に押さへ込むことが不自然過ぎるからである。この問題を解決するために、フェルミオンとボソンを全て対称にする超対称性(SUSY)を導入する。もしSUSYが本当に成り立つなら、0.1~2 TeVに沢山のSUSY粒子が存在しSSCやLHCで続々と発見されるはずである。

さて実験でヒッグス機構をどう検証するか? 標準ヒッ

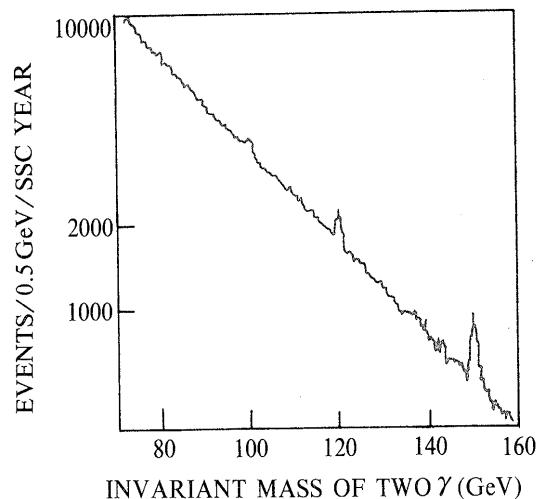


図6  $H \rightarrow \gamma\gamma$  のシミュレーションで再構成された不変質量分布. 鋭いピークがヒッグス粒子によるもので質量が 80, 100, 120, 150 GeV の場合を重ねてプロットしてある. (Lスター実験提案書からの引用.)

グス粒子の特徴は、フェルミ粒子との結合定数がフェルミ粒子の質量に比例すること、W/Zとの結合が強いことにある。その結果図5に示されているように、標準ヒッグス粒子の分岐比はその質量に強く依存する。そのため実験の観点から研究は  $M_H$  の値で次の4段階に分けられる:

- (1) 53 GeV~80 GeV, (2) 80 GeV~125 GeV, (3) 125 GeV~1 TeV, (4) ヒッグス粒子の無い場合.

(1)  $53 \text{ GeV} < M_H < 80 \text{ GeV}$ : LEPがそのビームエネルギーを1994年迄に100 GeVに上げるので、 $e^+e^- \rightarrow ZH$ のチャンネルを使って確実に発見出来る。SUSY理論によれば中性ヒッグス粒子は3個ありうち1個はZボゾンより軽いので、<sup>9)</sup>LEPで見つかるかも知れない。LEPで発見されればSSCやLHCは必要なくなるか? 否である。むしろTeV領域に豊富な新物理が潜んでいることが保証されたことになる。LEPで発見できなかった場合、その先は現存の加速器では無理で、SSCやLHCの完成を待たなくてはならない。

(2)  $80 \text{ GeV} < M_H < 125 \text{ GeV}$ : この領域ではバックグラウンドがひどく発見は易しくない。分岐比は0.1%と小さいが、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ のチャンネルが最も良い。高精度の電磁カロリメーターで二つの孤立ガンマ線の不変質量分布をとりピークを探す(図6)。このためには1%を切るエネルギー較正など測定器の困難さが伴う。 $pp \rightarrow HWX \rightarrow \gamma\gamma l\nu X$ とか $pp \rightarrow HtX \rightarrow \gamma\gamma l\nu X'$ の様にWやtが伴う反応を利用すればS/N比が上がり測定が楽になる。しかし頻度が少ないので、発見には2~3年を要する。

(3)  $125 \text{ GeV} < M_H < 1 \text{ TeV}$ : この領域ではヒッグス粒子は主にグルーオン融合やWW, ZZ融合過程を経て生成される。生成頻度は十分である。大きなバックグラウンドを避けるために、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^-l'^+l'^-$  ( $l, l' = e \text{ or } \mu$ )なる崩壊モ



図7  $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$  を飛跡検出器でどのように見えるか計算機シミュレーションしたもの。ヒッグスの質量は 400 GeV とした。ヒッグスからの  $\mu$  粒子は矢印で示してある。他の飛跡は同時に発生した低エネルギー粒子。

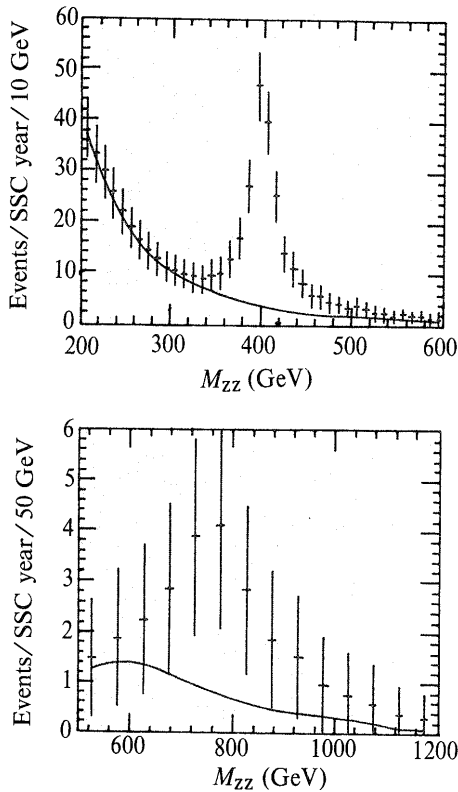


図8  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu, 4e, 2e2\mu$  のシミュレーションで再構成された不変質量分。実線はバックグラウンド。ヒッグスの質量が (A) 400 GeV と (B) 800 GeV の時。

ードを用いて検出する。0.12% の分岐比しかないが、高い横運動量をもつ 4 個のレプトンがジェットから離れて出てくるので同定が容易である。しかも十一対は Z 粒子の質量になると条件を課することで殆どのバックグラウンドを落とせる。図 7 にこの計算機シミュレーションを掲げた。4 個のレプトンの不変質量分布をとると図 8 の様になると予

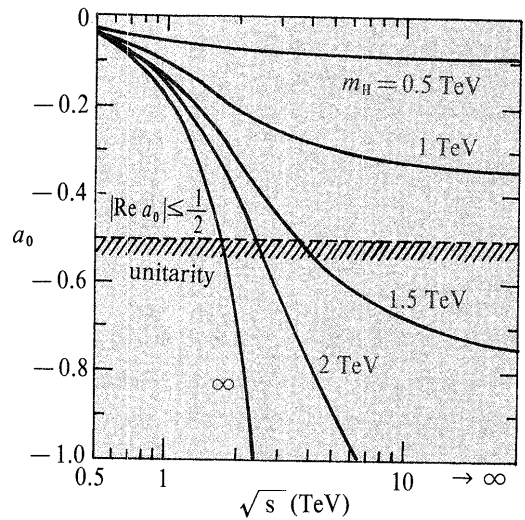


図9 標準理論に基づいた  $W^+W^+ \rightarrow W^+W^+$  散乱の  $L=0$  部分波振幅のエネルギー依存性。  $\sqrt{s}$  は  $W^+W^+$  の重心系エネルギー。ヒッグス粒子の質量が 1 TeV を越えるとユニタリ境界の  $-1/2$  を越えてしまう。(V. Barger 他より引用。)

想される。この分布には測定器の精度や検出効率、バックグラウンドを落とすための種々のカットなどが考慮されている。この探索方法は  $M_H$  が 200 GeV から 800 GeV 程度まで有効だが、それ以上の領域ではピーク幅が広がるのでヒッグス粒子の同定が難しい。しかし別の崩壊モードの  $H \rightarrow ZZ \rightarrow \nu \bar{\nu} \nu \bar{\nu}$  (分岐比 0.7%) が有効になってくる。この場合には二つのニュートリノによる消失横エネルギー (missing  $E_T$ ) の測定が必要となる。そのため衝突点をカロリメーターでくまなく囲むことが要求される。

(4)ヒッグス粒子の無い場合: まずヒッグス粒子が「素」粒子でなくテクニクォークや  $t\bar{t}$  の対凝縮の様な複合粒子の時は、上記 (1)~(3) と同様な実験的検証が出来るので発見できる。おまけにテクニクォークの共鳴状態がどんどん出てくる事も有りうる。

新しい相互作用力  $\lambda$  が強い場合、ヒッグス粒子は 1 TeV 以下に無い。しかしこの時には W や Z ボゾンの縦スピン成分  $W_L, Z_L$  同士の散乱、例えば  $W_L W_L \rightarrow W_L W_L$  の部分波振幅を摂動計算すると、図 9 に示す様に 2 TeV 付近でユニタリ境界を越えてしまう。ヒッグス粒子が 1 TeV 以下にあればうまく振幅間に相殺が起こりユニタリ境界には達しない。ユニタリ境界を越える事は原理的にありえないので、ヒッグス粒子が 1 TeV 以下に無いのなら、必ず予測出来ない何か別のことが起こらなくてはならない。すなわち GWS 理論はここで破綻し新しい事が起こるのである。この解明の糸口は 1~2 TeV 領域で  $W_L W_L \rightarrow W_L W_L$  等の反応を研究する事である。<sup>6)</sup> SSC ではエネルギー的にそれが可能である。  $t\bar{t}$  対生成から生ずる  $W_T$  (W の横スピン成分) のバックグラウンドが多いので、それらを落とすため

図10 KEK-NTTの共同研究で開発されたVLSI回路の一例。0.8 $\mu\text{m}$ -CMOS技術を使った時間精度 $\pm 0.5\text{ ns}$ 、奥行1 $\mu\text{s}$ の時間デジタイザー(TDC)。4チャンネルで大きさは5 $\times$ 5.6 $\text{ mm}^2$ 。消費電力は7 $\text{ mW/ch}$ と非常に小さい。

$W^+W^+$  など同電荷符号の $W$ 対を捕えるのが最も良い。しかし $10^{33}/\text{cm}^2/\text{s}$  ルミノシティではその頻度が約10個/年なのでもっと高いルミノシティが要求される。SSCの設計ではそれが可能である。

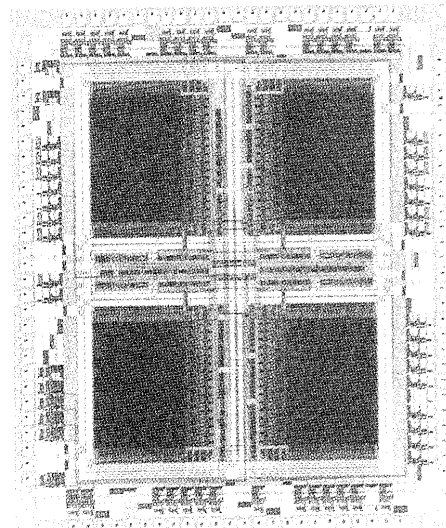
以上期待される現象数も含めてまとめると表3のようになる。ヒッグス粒子は、その質量が80 $\text{ GeV}$ まではLEPで、80 $\sim$ 125 $\text{ GeV}$ の間は測定に困難が伴うもののSSCで、それより高い場合も1 $\text{ TeV}$ の限界までSSCで発見できる。よしんばヒッグス粒子の無い場合でも、1 $\sim$ 2 $\text{ TeV}$ 領域の $WW$ 散乱などに標準理論からのズレが見つかる筈である。このように、LEPとSSCの組み合わせで、確実に謎のヒッグス機構の原因を解けるか、もしくはその手がかりがつかめる。

## 6. SSC 実験装置

陽子・陽子衝突から発生する2次粒子を測定して衝突現象を観測するのが実験装置で $\text{TeV}$ の高エネルギー粒子を対象とするため、大型かつ複雑な粒子検出器の集合体である。また実験環境は粒子検出器にとって非常に苛酷である。<sup>7)</sup> ビーム衝突が16 $\text{ ns}$ 毎に起こり、1秒間に $10^8$ 回の陽子・陽子非弾性散乱が発生する。1回の散乱あたり平均約200個の2次粒子が発生するので、測定器は異常に高い粒子頻度と放射線レベルに曝される。このため測定器は以下の基本条件を満たさなくてはならない: (1) 応答速度が高速( $\sim 10\text{ ns}$ )である, (2) 検出器を細分化しチャンネル数を多くすることで多粒子現象の情報を忠実に採る, (3) 放射線による損傷が無いか少ない, (4) 毎秒1億回の散乱の中から素早く目的の面白い現象を選択するトリガー機能。従来の検出器技術ではこれらは大変難しい事なので、ここ数年にわたりSSC用測定器の検討と検出器のR&Dが精力的に進められてきた。主要なR&Dは耐放射線性の研究と先端エレクトロニクス技術の活用である。特に高速、多チ

表3 中性ヒッグス粒子の生成, 崩壊幅, 探索方法  
( $t$ クォークの質量を150 $\text{ GeV}$ とした)。

質量 $M_H$ ( $\text{GeV}$ )	崩壊幅 $\Gamma_H$ ( $\text{GeV}$ )	生成断面積 ( $\text{pb}$ )	探索方法	SSC1年間での 現象数 ( $S/N$ )
100	0.003	110	$H \rightarrow \gamma\gamma$	1,100/20,000
			$HW \rightarrow \gamma\gamma lv$	6/ 3
			$Htt \rightarrow \gamma\gamma lvX$	21/ $\sim 10$
140	0.007	80	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\text{ leptons}$	36/ 6
200	1.5	55	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\text{ leptons}$	230/ 50
400	25	40	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\text{ leptons}$	190/ 40
600	100	12	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\text{ leptons}$	45/ 10
800	230	4.5	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\text{ leptons}$	14/ 6
			$H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+ l^- \bar{\nu} \nu$	190/ 125



ャネルのデータ処理の実現にはVLS技術の応用が不可欠であり、研究者自身が特殊LSIを設計するまでになってきている(図10)。

日本の研究者が参加しているSDC実験グループは、表4に示すように、12カ国からの研究者が参加している国際協力チームである。このグループの提案するSDC実験装置(図11)はヒッグス粒子発見を主目的とする高い横運動量物理用の汎用測定器である。これまでにない大型のもので総工費は約6億ドルである。SDC実験装置の基本パラメータを表5に掲げた。中心飛跡検出器を超伝導ソレノイド電磁石の中に設置し、カロリメーターとミュオン検出器がそれを取り囲んでいる。現在6週間に1回の割合で会合を開き、実験装置の設計を詰めている。技術開発は高度なセンサー技術、VLSIを駆使した高速エレクトロニクス、大量高速データ処理などハイテク技術の多岐にわたる。今後92年4月に正式提案書を提出し、92年10月より測定器の建設を開始する。

## 7. SSC と LHC の比較

表6に二つの計画の比較を示す。SSCに対する計画としてLHCの主な特徴は以下の3点であると思われる。

- (1) 既存施設の利用: 現存のLEP用トンネルと入射器など諸施設が存在するので建設費が少ない。
- (2) 10テスラの超伝導電磁石: NbTiの運転温度を1.5

表4 SDC グループメンバー国別参加者数。

国	参加者数	国	参加者数
アメリカ合衆国	398名	日本	89名
ソヴィエト連邦	69名	アメリカ合衆国企業	32名
カナダ	21名	中国	19名
イギリス	15名	イタリア	11名
フランス	6名	チェコスロバキア	5名
ルーマニア	5名	イスラエル	3名
ブルガリア	2名		

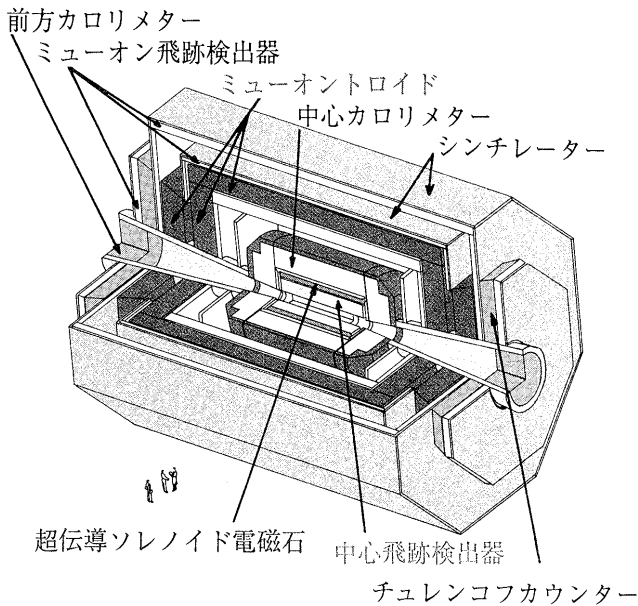


図 11 SDC 測定器案の外観図。高さ幅が 22 m, 全長 36 m, 総重量 27,000 t, 総工費約 6 億ドル, 研究者数 675 名。

表 6 SSC と LHC の比較表。

	SSC	LHC
周長	87.1 km	27 km
最高エネルギー	20 TeV	7.7 TeV
磁場	6.6 T	10 T
ルミノシティ	$10^{33}/\text{cm}^2/\text{s}$ 以上	$1.7\sim 5\times 10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$
加速器トンネル	新しく建設	既存
入射器	新しく建設	既存
研究所	新 (SSCL)	CERN
将来オプション	未定	ep, 重イオン衝突
建設費	82 億ドル	約 20 億ドル
完成年度	1999 年	1998 年
測定器	汎用可	限定される
検出器技術	やっとな可能	難しい
放射線レベル	高い	非常に高い
軽い粒子 (t, b, W, Z) の物理	SSC~LHC	
高い Pt の物理と新粒子の探索	SSC~3×LHC	
ヒッグス粒子探索		
80~125 GeV	SSC が有利	
重いヒッグス粒子	SSC	LHC
$10^{33}/\text{cm}^2/\text{s}$ で	800 GeV まで可	400 GeV まで可
$10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$ で	1 TeV まで可	800 GeV まで可
TeV 領域の WW 散乱	SSC で可能, LHC で殆ど不可	

K に下げて実現する。ヨークの中に二つのコイルが入る 2-in-1 方式を採用する。この磁石の開発が開始されたが、SSC に比べてより一段と技術上のチャレンジである。

(3) 高いルミノシティ: LHC はエネルギーが SSC の 3 分の 1 なので、物理の上で競合するためにルミノシティで稼がなくてはならない。そのため LHC は目標を SSC の 10 倍の  $10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$  に置いている。しかし SSC でも  $10^{34}$  は可能である。問題は実験装置である。既存のテバトロン (ルミノシティ  $\sim 10^{30}/\text{cm}^2/\text{s}$ ) での実験経験によれば  $10^{33}$  でさえ大変な挑戦といえる。過去数年に亘る検出器技術の R&D の結果を考慮すると、 $10^{33}$  ならば何とか汎用の  $4\pi$  測定器を作れるとの見通しがある。その 10 倍のルミノシティのもとでは測定器は特殊用途に限定されたものになる。検出器の放射線損傷も大きな問題となる。

物理での相違も表にまとめた。高い  $P_t$  の物理と重い新粒子の探索では、生成断面積と  $S/N$  比がエネルギーに強く依存するので SSC~3×LHC といえる。ヒッグス粒子探索では、80~125 GeV では測定が困難なので断面積が高く  $S/N$  比の良い SSC が優位である。ヒッグス粒子が存在しない場合 TeV 領域での  $W_L W_L$  散乱の研究は LHC ではエ

ネルギーが低すぎて及ばない。SSC はヒッグス粒子の全領域を探索でき、従って必ずなんらかの答えが出せる。

SSC も LHC も次の世代の物理を目指して、強力に競争しながら推進中である。この状況は TeV 領域の物理の魅力をも十分に物語っているのである。

### 8. おわりに

現在、標準理論は全て実験事実を見事に説明する。しかしその重要部分のヒッグス機構が全く謎のままである。SSC での実験を通じて、このヒッグス機構の原因を解明するか、もしくは手がかりをつかむことが必ずできる。それはまた殆ど確実に標準理論を超えるものである筈なので、新しい物理の夜明けとも言える。

### 引用文献

- 1) Report on the SSC Cost and Schedule Baseline, Jan. 1991, U. S. Department of Energy, DOE/ER-0468P.
- 2) AD Hoc Committee Report, SSC-250/Rev, Dec. 1989.
- 3) Large Hadron Collider Workshop, ed. G. Jarlskog and D. Rein, CERN 90-10, ECFA 90-133, Dec. 1990.
- 4) Site-Specific Conceptual Design Executive Summary, Jul. 1990, M. D. G. Gilchrist and K. Metropolis, SSCL-SR-1055.
- 5) E. Eichten, I. Hinchliffe, K. Lane and C. Quigg: Rev. Mod. Phys. **56** (1984) 579.
- 6) M. S. Chanowitz and M. K. Gaillard: Nucl. Phys. B **261** (1985) 379.
- 7) Report of the Task Force on Detector R & D for the SSC, SSC Central Design Group, SSC-SR-1021, Jun. 1988.
- 8) 最近の計算では補正を入れると Z ボゾンより重くなると言われている。

表 5 SDC 測定器案の内訳。

高さ×幅×長さ	22 m×22 m×36.5 m
総重量	27,000 トン
シリコン検出器	28 m <sup>2</sup> , 1 千万チャンネル
中心飛跡検出器	15 万ワイヤーチェンバー
	30 万シンチレーティングファイバー
カロリメーター	7 万チャンネル
ミューオン検出器	11 万ワイヤー, 16 千シンチレーター
超伝導ソレノイド	2 テスラ, 130 M ジュール
オンライン計算機	10 万 MIPS
工期	7 年
総工費	約 \$600 M (約 800 億円)