

訂正版

PHYS-UT
YY-1

ヨーロッパを中心とする高エネルギー物理学の発展と現状

— 素粒子研究所の問題を考えるために —

1968年7月

山 口 嘉 夫

東京大学理学部物理学教室

ま え が き

この報告は、筆者が「自然」の1968年6月号及び8月号以下に数回にわたって投稿した（及びその予定の）「外からみた素粒子研究所」に若干の改訂を加えたものである。これが素粒子研究所の問題を考える上に、いづらかでも役立つことを切に望んでいる。

なお、一部重複するところがあり、また少し古くなっていると思うのだが、参考のために、筆者が「素粒子論研究」の34巻4号(1966)P.D60~D75にのせた「colliding beam machinesについて」(1966年11月11日記)、及び同36巻3号(1967)P.243~258にのせた「meson factoriesについて」(1966年12月末記)をここに再録した。

1968年7月10日

山 口 嘉 夫

目 次

ヨーロッパを中心とする高エネルギー物理学の発展と現状

	ページ
1. 科学振興について.....	1
2. 基礎科学のすすめ方.....	2
3. 「案研」設立の必要性.....	2
4. 加速器の発展史.....	2
5. アメリカの高エネルギー研究.....	3
6. ソ連の高エネルギー研究.....	3
7. 加速器設計の問題.....	9
8. 高エネルギー物理への三つの“手”.....	10
9. CERNについて.....	12
10. Araldi 勧告.....	13
11. 西ヨーロッパの頂上計画.....	15
12. 西ヨーロッパの底辺計画.....	17
フランス.....	17
西ドイツ.....	19
イタリア.....	20
イギリス.....	21
西ヨーロッパの小国.....	23
13. CERN や Serpukhov をめぐる国際交流.....	28
14. 各国の高エネルギー研究支出.....	30
15. 高エネルギー物理学の効用.....	

附録 1 colliding beam machines について 55
 [素研 34 (1966) D60 ~ D75]

附録 2 meson factories について 68
 [素研 36 (1967) 243 ~ 258]

加速器一覧表

	ページ
proton ^{no} synchrotrons	6
electron ² synchrotrons	7
^c storage rings ^{12 12}	8

synchrotrons

ヨーロッパを中心とした 高エネルギー物理学の発展と現状

素粒子物理学専攻であるといえば、人々は「素粒子研究所」設立の計画、とくにその難行していることや、大型予算のことをもち出したりして、話題にこと欠かない。ニュースとしての会話は一応できるのだが、さて、なぜこんな研究が必要であるかを専門外の方々にわかってもらうのは、まさに難事中の難事である。実のところ、ときには自称専門家のなかにも、また隣接分野の専攻の学者のなかにも、実体を把握しているかどうかと疑われる人によつかることがある。そこで、この「素研」問題を考えるための材料提供のつもりで、この文を書いてみた。本誌67年9月号に小林高幸氏が、「世界の加速器建設はすすむ」という題ですぐれた解説を書いておられるので、読者はそれを一読されたものとして（もしまだなら、ぜひ読んでいただくとして）、話をすすめたい。

人間以外の天然資源の乏しいわが国が基礎科学をすすめてゆかなければならないことはあまりにも自明で、今さら論ずるまでもないだろう。これまで日本の国民総生産ののびは世界的驚異とされ、造船、鉄鋼、自動車など、世界屈指の生産量のものが多い。この有力な工業国日本において、基礎科学への対策がきわめて貧弱であり、教育と研究施設の不備なことは、先進国のなかでは異例に属する。基礎科学を含めて、科学は国力の基本の一つであるはずだ。科学の振興なしに今日の繁栄はあっても、明日への希望は考えられない。米ソ二大国は別格としても、戦後の西ヨーロッパの国々が復興のなかでこのことを考えて手を打ってきているのに、明日の日本を思うと暗澹としてしまう。今にして、根本的な科学政策をとらなければ、われわれは次の世代にとんでもなく悪い状態を与えることになる。

もっとも科学をすすめないで、平凡な国に日本を仕立てるといふ考えもあり得よう。多分、人口をかなり減らさなければならぬだろうが、今までに得られた、よその国でテストされた科学と技術をよりよく活用し、こじんまりとした、身のほど知った平和をたのしむというわ

けである。そのときの国民の生きがいは、たとえばわが家のバラの花をよく咲かせることになるかもしれない。けれども、そんな将来を次の世代に残すのにあきたらないのなら、やはりわが国が独自の科学を進めなければならないことになる。

むしろ、ここまでは大して異論はなからう。議論百出するのは、では科学をどうして進めるか、また科学のどの分野に重点をおいてゆくかといった点である。これらについて少し議論してみよう。

いわゆる科学振興のなかでの基礎科学と応用科学のバランスについては、次の世代をも含めた国民全体の利益を考えるとという立場に立って、多方面から検討され、政府にも学者にも了解された方針がなければならない。なにかにつけて対立ムードのある現状であるが、日本の将来にとって悔なき手をうってゆくのが、われわれの責務であろう。

既知の科学をある目的に利用するためならば——そのことの重要性は、現代においていよいよ増しているが——、中央からの指令の下に能率的に作業を進めることも可能である。また、社会よりの緊急な要請に応じて、早急に技術開発を行なうのであれば、社会的効用にもついた重点のおき方が考えられよう。このごろのように科学振興に費用がかかるようになれば、ますますそのような傾向になるのは、ある程度やむを得ないかもしれない。けれども基礎科学に対しては、確立した完全な方策といったものは存在しない。ただ意欲あるグループの計画を実現させるべきであるということにつきる。

専門の分化が進んだ今日、基礎科学の多くの分野に通曉した学者はいなくなった。人間の能力に限りがあつて、広げれば浅しである。人文科学と自然科学、あるいは後者のなかでも生物とか物理、化学などの多くの分野の間に重点をつけるべく、良心的で妥当な判断をなし得ようとは思われない。科学は、その歴史の示すとおり、多くの紆余曲折を経、ときとして思わぬ発展をするものである。未知のものを探つてゆく基礎科学の世界では、あらゆる可能性、いろんな考え方を進めてゆくほかはない。

といて科学者は、あらゆる試み（やプロポーザル）をどれも同じように価値あるものと見なすほど無方策というわけではない。専門ないしは隣接分野については、まともな研究者ならば、プロポーザルの真價の判定をほとんどの確に行なうことができる。

次に、種々の分野の専門家が集って討論して、基礎科学政策を決定できるであろうか。隣接科学を次々につないでゆくとして、ある程度の調整はできるだろうし、たとえ不十分であるにもせよ、調整を行なうことが実際上要求されることであろう。専門の細分化した今日、科学者間の相互理解は絶対に必要なことであり、対話のぞましいことはいままでもない。政治におけると同様に、民主主義は大きな誤りをふせぐベターな方式であろうが、基礎科学政策を単に学者の投票で定めるべきだというわけにもゆかない（ガリレオ時代に、ガリレオに対して教授連が投票したらどういふ結果になったろうか）。ここで重要なのは、討論に加わる人々が本当にいい研究者であることだ。専門の研究をおろそかにして、計画の机上論にうつつをぬかすようでは困るのである。

科学は偉大な学者の出現、もしくは能力ある科学者のよい相互作用によって急展開するものである。また、外国で進んでいる分野は、そのよい刺激のもとに伸びることもあろう。

何にもまして、基礎科学の分野にとって重要なことは、その分野の多くの研究者が骨身をけずって研究に専念し、それを発展させたいとの意欲に燃えていることであろう。そうでない科学者はいるはずがないと反論されそうだが、意欲と能力（あるいはポテンシャルティ）の高いと判断される分野は（学者のみならず、広く国民の支持のもとに）当然より強く推進されるべきである。

ほかにも基礎科学のすすめ方についていふべきことは数多くあるであろうし、上に述べたことはあまりにも自明だといわれるに相違ない。それにもかかわらず、こんなことまで念をおしたくなる気持ちを汲みとっていただきたい。

3

ところで「素研」にもどうう。なぜ、われわれが「素研」設立をのぞむのか？ それは第一に、日本の数多くの研究者が「素粒子研究所」をつくって、素粒子の——とくに実験——研究をしたいからである。そして、それは日本の国力と研究者の能力に応じたものとして、十分に考えてできあがった計画であったし、先進国との比較からみても妥当と思われるものである。本来ならば、ここで素粒子物理の意義や必要性を述べるべきであろう。しかし、それはいいふるされているので、ここでは省略さ

せていただく。「素研」についていろいろな批判もあり、それについては虚心に耳をかたむけ、とるべきはとり、またはわれわれの説明不足の点は補ってゆきたいと心から願っている。

「素研」に対する批判の一つに、特定の一小分野にあまりにも重点をおきすぎるといふのがあり得よう。われわれは「素研」計画とともに、他の基礎科学の分野についても画期的な振興がなされなければならないと信じている。「素研」に大きな費用がいくからといって、他の基礎科学を圧迫するのでは日本の将来が思いやられる。ただ、われわれが今できるだけ早く「素研」を設立したいとのぞむことに限っていえば、素粒子の研究が基礎科学の重要分野の一つとして重点をおくべきもので、またそうされるだけの準備ができていというよりほかに仕方がない。大変消極的で申しわけないが、日本が基礎科学と応用科学のすべての分野で超大国なみのことができようはずがない。けれども、われわれの能力をはかり、また素粒子物理の研究が他の分野に及ぼす影響を考えて、われわれは日本においても素粒子物理の分野が、少なくともヨーロッパの工業国なみに重点をおかれるべきだと考えているのである。われわれは力一杯の努力を傾けて、「素研」設立と、そこでの研究に従うことを約束する。

4

「素研」計画を考えるのには、外国における素粒子研究の様子を多少歴史的にふり返ってみるのがよいと思う。そのあとで、世界における「素研」の地位や日本における「素研」の効果などを考えるのが適当だと考えるからである。

現在の素粒子実験の主流は、加速器を用いるものである。もちろん、加速器と実験をつなぐために豊富な付帯施設がないと困るのだが、加速器のエネルギーはやはり高エネルギー物理（実験）の進歩を示す便利な指標となる（今後、簡便のために加速器とだけかくけれども、それは加速器とその周辺の設備を含めた研究施設の意味にとっていたきたい）。小林氏の解説と重複するきらいはあるが、加速器の進みをふりかえてみよう。

1930年代はサイクロトロン（をはじめ重要な加速器）が発明され進化してゆく時代であった。核物理実験につかわれる粒子線のエネルギーは次第に上昇し、実験の規模が少人数で机の上で行なえるものから、大チームによるものへかわり、加速器をもつ実験室は工場のごとき観を呈するに至った。サイクロトロンそのものの大型化の限界（陽子で十数MeVまで）は、すでに第二次大戦直前のころに到達していた。

戦争中の一時的足ぶみをおえて、戦後にはとくに米国で高エネルギー加速器ブームがおこった。この際、新しい加速機構の実用化と新技術の応用が行なわれたことが

いちじるしい(シンクロサイクロトロン、シンクロトロン、ベータトロンの登場)。1950年までにアメリカには数百 MeV の電子加速器および陽子加速器が数台でき、中間子を人工的につくりだして実験をするに至った。このときより高エネルギー物理は素粒子物理と同じ内容のものとなった。

1950年代に入ると、アメリカのモノポリーの時代は終わる。ソ連と西ヨーロッパの国々も高エネルギー加速器をもつようになる。数百 MeV から 1 GeV 級へ、さらに 10 GeV のものまでが現われる。高エネルギー物理の巨大化はおとろえることなくつづく。技術の進歩によって復活した(電子の)線型加速器の出現も、この年代に入る。1~10 GeV クラスの加速器の建設には5~6年の時間がかかる。また、加速器建設の費用はますます増大する。次の年代の加速器は高くつきすぎて無理かと心配されはじめたころ、救世主が登場する。強収束原理の発明である。これによって、次の大型加速器の建設を安く上げることができた。1959年と1960年にそれぞれ完成する。

CERN とブルックヘヴン国立研究所(BNLと略記)の陽子シンクロトロンはその成果である。

1950年代にいちじるしいことは、加速器を含めて研究施設の大型化に伴い、一大学または一研究機関に属した高エネルギー設備という枠から脱皮して、他の研究者にも実験の機会を提供することが盛んになった。CERNやBNLは、このような型の研究所として運営される。スケールは小さいが、この年代にわが国でも大学附置の共同利用研究所(東大の原子核研究所もその一つである)がつくられるようになったのも、同じ事情によるものである。

1960年代になっても加速器レースは少しもおとろえていない。CERN や BNL のものには及ばないが、いろいろな大加速器がアメリカ、ソ連、ヨーロッパ各国に次々に整備されてゆくことが目につく。また日本にも 1.3 GeV の電子シンクロトロンができて、やっと高エネルギー実験の末席にすわれるようになった。それとともに既存の加速器の大改造が次々と行なわれるに至った。カリフォルニア大学のベータトロンの改造が行なわれ、目下 CERN と BNL とはそれらの陽子シンクロトロン改造——強度を大幅に増す——と実験設備拡充の競争をしている。さらにヨーロッパとアメリカで数百 GeV 加速器計画の準備作業がすすんでいる。次に各国別の状況をみておこう。

5

アメリカは戦後、いちちやく高エネルギー物理の発展をリードした。その国力にものをいわせて次々と巨大加速器をつくった。しかし、アメリカは加速器の世界をいつも保持したわけではない。カリフォルニア大学のベータトロン(1954年完成)までの世界一は、ドブナ(東欧原子

核共同研究所)のシンクロファゾトロン(1957年完成)に、ついで CERN の陽子シンクロトロン(1959年完成)にタイトルをうばわれ、BNL の陽子シンクロトロン(1960年完成)で再びタイトルをとりもどした。それは、1967年秋、ソ連のセルプコフに 70 GeV シンクロトロンの出現するまでつづくのである。しかし、高エネルギー実験研究の実力は、なにも加速器のタイトルだけで済まるものではない。加速器の有効な使用、加速器周辺の豊かな施設、経験にきたえられ進んだ測定技術、データ処理などの総合能力によるものである。この意味では、アメリカの高エネルギー実験での実力は、今なおゆるぎない存在である。

さらにアメリカでは、200 GeV の陽子シンクロトロンの準備をしている。この超大加速器をもつ国立加速器研究所(NPL)はシカゴ近傍のウェストンにおかれることになり、コーネル大学のウィルソンを所長にえらんで、今年度こそ本建設に入らんものと意気こんでいる。

アメリカはヴェトナム戦にふかく入りこみ、ドル危機が進行したため、ここ数年間、高エネルギーを含めて科学への投資は頭うちないし削減されてきた。そのため高エネルギー計画の実現は大幅におくれた。このおくれは、ヨーロッパの高エネルギー計画をもおくれさせるよう働いた。アメリカがやらないのにヨーロッパが先にやることはないというわけである(ヨーロッパのぬきがたい対アメリカ・コンプレックス)。過去の数年間は、日本の科学にとって、とくに「素研」にとっては、欧米に一挙に追いつき肩を並べる絶好のチャンスであったはずである。40 GeV の加速器をもつ「素研」計画では、強くこのことを考えていた。この時期を計画の審議と討論に費し、準備作業がスムーズに進まなかったことは——それにはそれなりの理由もあり、無駄であったというつもりはさらさらでないが——大変残念に思われる。

先にもふれたように、アメリカでは加速器のみならず、泡箱の大型化、エレクトロニクス実験技術の進歩と計算機との直結、データ解析の自動化、低温技術の発展など、数多くの目ざましい進歩がみられたが、それらは坦坦たる大道を進んだわけではない。高エネルギーの独走に対する他の分野よりの風当たりが強いし、高エネルギー研究者間の競争もすさまじいものがある。むしろ、その歯に衣をきせない相互批判と競争のなかから、高エネルギー研究の活力が強められる点をかうべきであろう。

素粒子物理はわが国では巨大科学の雄とみなされるようだが、アメリカでは高エネルギーは巨大科学のビッグファイブ(宇宙、海洋、原子力、気象関係など)に入らない。

6

ソ連は、しばしば世界一の加速器の建設を発表して、高エネルギーの学界をおどろかせた。ソ連の内部事情は

外からはなかなかわかりにくく、深くカーテンにかくされていたからである。

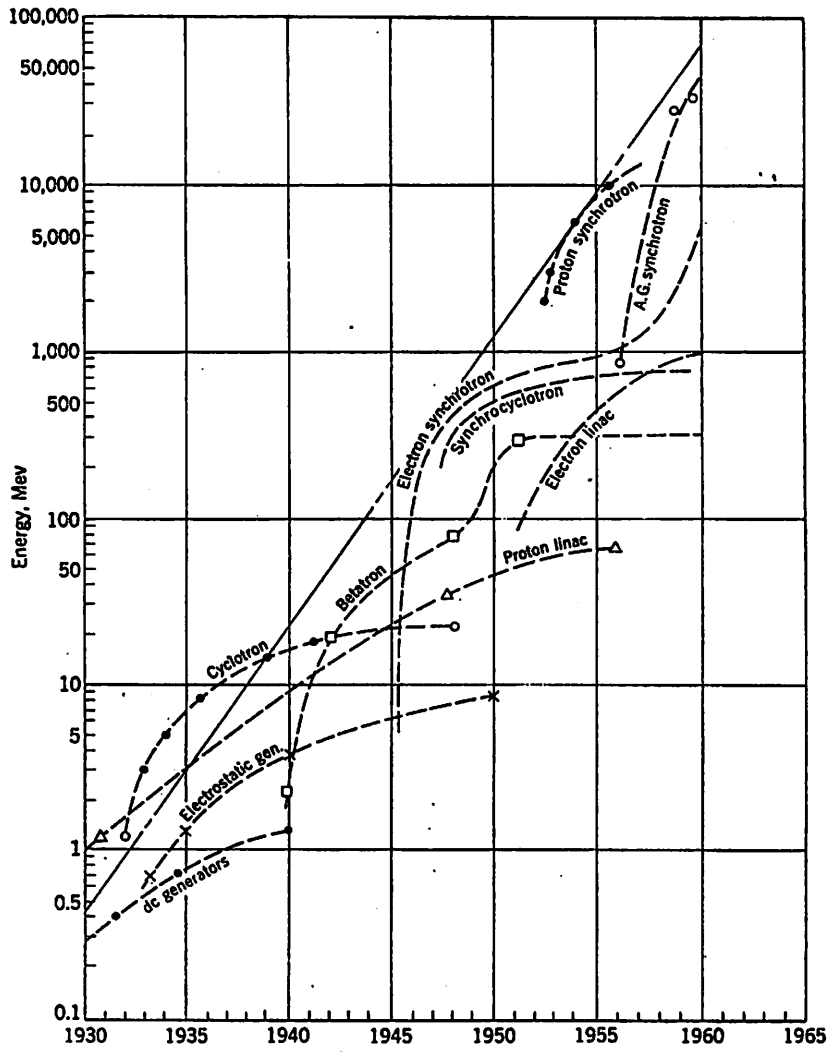
ついこの間まで、宇宙における華々しさに比べると、ソ連の高エネルギー実験は何となくやぼったい存在であった。ドブナの例をとってみても、そのサイクロトロンをはじめ核物理、核化学はいい仕事をしているのに、しばしの間世界一を誇った 10 GeV のシンクロファゾトロンは、ビーム強度が弱く、めばしい成果をあげるには至らなかった。これは、西側の見るところでは、ソ連の大学・研究所相互間の交流が悪いためとみられる。特に加速器は別の専門の機関に発注して、高エネルギー研究者との接触なしに製作され、完成後高エネルギー研究所に引きわたされるとさえいわれた。すなわち、加速器建設途上での高エネルギー学者と加速器製作者の間のフィードバックに欠け、使いにくいものができあがるというのである。その当否はさておき、シンクロファゾトロンが世界的にみて水準以下であったことはたしかである。それに、高エネルギー実験のほうでも、エレクトロニクス、計算機、泡箱など測定器関係のおくれが目についた。

ソ連の高エネルギーが近代化し、西側との交流を深めるようになったのは、1960年代に入ってからのことといえよう。その成果は、きわめてスマートにつくられたセルブコフの 70 GeV 陽子シンクロトロンとして現われた

と考えられる。この加速器は去年の秋完成し、目下調整中で、まもなく実験がはじめられる予定である。今後、消化するのに2カ年くらいかかりそうなほど、ソ連国内から高エネルギー実験の申し込みがあり、多数の実験がスタートを待機しているものと思う。70 GeV 加速器の国際的な共同利用も進められつつある。政治的な理由でアメリカは参加できないが、CERNとフランスが大いに協力することになっている。その実体については、CERNやフランスの項で述べることにしよう。いずれにせよ、このセルブコフの研究所がどんな活躍をみせるか、世界の学者から期待をもって見まもられている。

ソ連のなかで、西欧的でユニークな研究所としてシベリアのノボシビルスクのものがあげられる。そこでは、多くの新技術を開発、駆使して、新しい加速機構の研究をすすめたり、独得な colliding beam machine をつくったりしている。後者については、他の国の同種の器械といっしょに説明することにした。

実は、わが国の「素研」計画を論ずるには、アメリカやソ連のような超大国はあまりいい参考とはいえないので、むしろヨーロッパの国々がどういふふうか高エネルギー計画をたてたかのほうが、はるかに教訓的である。それについて以下に述べることにしよう。



Energies achieved by accelerators from 1930 to 1960. The linear envelope of the individual curves shows an average tenfold increase in energy every six years.

Table I - PROTON SYNCHROTRONS

(E ≥ 1 GeV)

Status	Performance - (Goals)				Injector Output		Magnet							RF System					
	Energy (GeV)	Pulse/sec	(10 ¹² p ⁺ /sec)	Energy (MeV)	Current (mA)	Field			Power Max (MW)	Ring			Weight		Harmonic	RF Range (M Hz)	Gain keV/turn	Power Max (kW)	
						Index n	At Inj (G)	At Max (kG)		Dia. (m)	Aperture		Fe (ktons)	Cu (tons)					
CERN																			
1. Geneva	1959 in use	28	1/3	1	50	135	288	147	14	32	200	7	14.6	3	130 (Al)	20	2.9-9.55	54	75
2. (Geneva)	Study (1977)	(300)	1/3	(10)	8,000	200	4770	355	12	180	2.4km	6	10	25	2100	4500	182-183	9,500	7200
France																			
3. Saclay	1958 in use	3	1/3	0.1	3.6	5	0.6	326	14.9	24	22	10.5	36	1.1	55	2	0.76-8.41	1.16	4
4. (Saclay)	Study (1973)	(45)	3/4	(1)	100	48	162	121	12.6		364	8.2	12.6	4.9	336	156	17-40	440	480
Germany																			
5. Karlsruhe	Study (1972)	(40)	1/1	(1)	2,000		642	930	13.6	31	300	4	8	2.4	272	96	6-30	420	200
Japan																			
6. (Tokyo)	Design (1973)	(42)	1/2	(1)	125	100	407	139	12	40	400	7.5	16	4.4	340	36	4-8.5	213	240
USSR																			
7. Dubna*	1957 in use	10	1/10	0.012	9		≤1	150	13	140	72			36	2700				
8. Moscow*	1967 in use	1**	1/2	0.01	1	1	191	250	9		17	1.6	2.1	0.016	2	5	1.25-25	2	10
9. Moscow*	1961 in use	7	1/6	0.05	4	10	(AG)	90	9.5	25	80	8	11	2.7		7	0.67-8.3	4.4	500
10. (Moscow)*	Study (19)	(1000)	1/3	(30)	18,000	0.006	7000	300	16	350	5.4km	4	6.6	20	6500	6800	~120	55,000	34 MW
11. Serpukov*	Con. (1968)	(70)	1/8	(0.1)	100	50	442	76	12	100	472	11.5	17	20	700 (Al)	30	2.6-6.1	380	
UK																			
12. Birmingham	1953 in use	1	1/4	0.0025	0.46	1	0.68	210	12.5	7	10	10	33	0.8	9	1	0.22-9.26	0.2	10
13. Rutherford	1963 in use	7	1/3	0.6	15	45	0.6	299	14	160	54	20	100	0.7	250	4	1.4-8	5.5	45
USA																			
14. Argonne*	1963 in use	12.7	1/2	1	50	30	0	482	21.5	110	55	13	81	4.7	68	8	4.4-14	10	60
15. Brookhaven	1952 ret.	3	1/5	0.5	3.6	20	0.7	295	13.8	26	23	16	65	1.65	70	1	0.33-4.18	1	50
16. Brookhaven	1960 in use	33	1/2.5	1	51	40	357	121	13	30	257	6.3	13.3	4	400	12	1.4-4.46	100	300
17. (Brookhaven)	Study (1980)	(1000)	1/1	(10)	25,000	0.002	(AG)	1500	60		1.5km	5	12.5	***				30,000	
18. Lawrence	1954 in use	6.2	1/5	1	19	25	0.67	417	15.5	121	19.3	25	112	9.7	347	1	0.3-2.3	1.5	100
19. Lawrence	Design (1972)	(1.4)	60/1	(13)	3	10	28	346 1545	10	1	32	4	10	0.8	8.2	8-100	1.6-32		800
20. NAL, Weston	Design (1972)	(200-500)	1/4	(15)	10,000	0.048	(AG)	495	9-22.5	65	2km	5	12.5	9000	900	1000	~52	3,460	2 MW
21. Prin-Penn	1963 in use	3	18.5/1	0.4	3	3	0.6	270	14		25	6	18	0.4	15	8	2.5-30	61	320

*Data from various sources, not verified.

**Also 650-MeV deuterons.

***Superconducting magnet.

F. T. Howard
ORNL-AIC, Sept. 1967

Table II - ELECTRON SYNCHROTRONS

E ≥ 1 GeV

Status	Performance (Goals)			Injector Output		Magnet						RF System						
	Energy (GeV)	Pulses/sec	10 ¹² e/sec	Energy (MeV)	Current (mA)	Field			Power Mean (MW)	Ring		Weight (tons)		Harmonic	RF (MHz)	Gain (keV/turn)	Power Max (kW)	
						Index n	At Inj (G)	At Max (kG)		Dia (m)	Aperture h x w (cm)	Fe	Cu					
Germany																		
1. Bonn	1967 in use	2.3	50	2	25	250	~23	100	10	0.55	22.2	4 x 9	133	17.4	116	500	330	80
2. Hamburg	1964 in use	6.25	50	2.5	40	120	~70	42	6.3	1.1	50.4	7 x 12	570	77	528	500	1,000	350
Italy																		
3. Frascati	1959 in use	1.1	20	0.01	2.5	50	0.61	27	10.2	0.15	8.74	5.7 x 19.2	100	10	4	42.8	4	16.5
Japan																		
4. Tokyo	1961 in use	1.3	22	0.8	9	100	14.8	80	11	0.4	10	3.5 x 11	53	7.9	16	138	10	20
Sweden																		
5. Lund	1960 in use	1.2	12.5	0.025	6.45	40	10.6	69	11	0.2	10.8	3.2 x 7	24	11.2	45	399	60	16
USSR																		
6. Yerevan*	1967 tests	(6)	50	(3)	50	200	115	66	7.92	1.6 pk	70	4.5 x 12	400	25	96	133	727	400
7. Tomsk	1964 in use	1.3	1	0.02	5.5	50	0.58	43	12	0.4	10.7	8.4 x 23	120	3	4	36.5	1.5	120
UK																		
8. Daresbury	1966 in use	5	53	6	40	500	~47	64	8	0.95	70.2	6.7 x 11	360	40.3	300	408	2350	480
USA																		
9. Cambridge	1962 in use	6.28	60	6	30	50	91	38	7.6	1	75	3 x 14	300	36.6	360	476	6,000	400
10. Cal Tech	1952 in use	1.5	2	0.05	10	500	0.6	90	13.3	0.25	9.6	6 x 18	155	18	4	40.2	0.7	250
11. Cornell	1964 in use	2.1	30	0.9	10	50	26	55	10	0.25	32	2.8 x 6.4	60	2.7	75	433	35	20
12. Cornell	1967 test	(10)	60	(6)	150	100	432	50	3.3	0.77	270	2.5 x 5.5	200	26	1800	713	10,000	425

*Data from various sources, not verified.

F. T. Howard
ORNL-AIC, Sept. 1967

Table III - STORAGE RINGS†

	Status	Particles	Design Energy	Ring Configuration				Magnet			RF System			Performance (Goals)			
				Rings	Dia. (m)	Aperture h x w (cm)	Beam λ-rings	n	Radius (m)	Field max (kG)	RF (MHz)	Harmonic	Input max (keV/turn)	Vacuum (torr)	Ring Current (Amperes)	Half-Life	Luminosity (cm ⁻² sec ⁻¹)
CERN																	
1. Geneva, CESAR	1963 in use	e	2 MeV	1	7.6	4 × 10	0	SF*	0.6		24	2		10 ⁻¹⁰		10s	
2. Geneva, ISR	Con. (1972)	p, p	28 GeV	2 con.	300	5 × 15	8	250	79	12	9.5	30	20	(10 ⁻⁹)	(20 × 20)	(12h)	(4 × 10 ³⁰)
3. Geneva, MSR	1965 in use	μ ⁻	1.3 GeV/c	1	5	4 × 6									40 μ ⁻ /pulse		
FRANCE																	
4. Orsay, ACO	1966 in use	e, e ⁺	500 MeV	1	7	6.5 × 15	1	SF	1.11	13.5	28	2	30	10 ⁻⁹	(0.05 × 0.05)	1h	(10 ³³)
5. Saclay	study	e	45 MeV		100		0	0.2				1					
GERMANY																	
6. Hamburg	proposed	e, e ⁺	3 GeV	2	50	2.5 × 10		SF		9	500				(1 × 1)		(5 × 10 ³²)
ITALY																	
7. Frascati/Orsay, AdA	1961 retired	e, e ⁺	250 MeV	1	1.5		1	0.55	0.58		147	2		10 ⁻¹⁰	0.001 - 0.001		
8. Frascati, Adone	Con. (1967)	e, e ⁺	1.5 GeV	1	17	8 × 22	6	SF	5	10	8.6	3	200	10 ⁻⁹	(0.1 × 0.1)		(3 × 10 ²⁹)
USSR																	
9. Kharkov	1963 in use	e, e	100 MeV	2 tan.	2	4 × 10	1	0.27	0.5	10	52	1	1	10 ⁻⁹		2m	
10. Novosibirsk, VEP-1	1963 in use	e, e	130 MeV	2 tan.	1	3 × 4	1	0.62	0.43	10		2		10 ⁻⁸	0.04 × 0.04		4 × 10 ²⁷
11. Novosibirsk, VEPP-2	1966 in use	e, e ⁺	700 MeV	1	3.5	8 × 14	1	0.6	1.5	15	25	1		10 ⁻⁹	2 × 0.02		10 ²⁷
12. Novosibirsk	Con. (1970)	[p, p̄] [e, e ⁺]	[25 GeV] [6 GeV]	1 + 1	115					45					(10 × 0.01)		(10 ³¹)
13. Novosibirsk, VEPP-3	Con.	e, e ⁺	3.5 GeV	1	~24	3 × 7	2	AG	8	72.5	18			10 ⁻⁹	(0.25 × 0.25) (0.1 × 0.1)	1h	
USA																	
14. Cambridge**	1966 tests	e	3 GeV	1	75	3 × 14	1	91		7.6	476	360		10 ⁻⁷	(0.1 × 0.1)	6m	(10 ³¹)
15. MURA	1967 in use	e, e ⁺	200 MeV	1	3	5 × 10	1	SF	0.61	12.3	32	1	50	10 ⁻¹⁰	(0.1 × 0.1)	22m	
16. Princeton/Stanford	1961 in use	e, e	500 MeV	2 tan.	4	6 × 25	1	SF	1.4	12	25				0.1 × 0.1		10 ²⁸
17. Stanford	Con.	e, e ⁺	3 GeV	1	68	10 × 38	2	SF		7.8	50	36			(1 × 1)		(10 ³²)

*SF = Separated function (AG) magnet assembly.
 **(Accel. and Storage in CEA; reactions in bypass).

†Note: These data were gleaned from the literature and have not yet been verified.

F. T. Howard
 ORNL-AIC, Sept. 1967

7. 加速器設計の問題

ヨーロッパの事情に立ち入る前に、高エネルギー加速器の選択・設計が一般にどのようになされるのか、少し述べることにする。

1 GeV クラスないしそれ以上の加速器を建設するには、5～6年かかるのが普通である。設計図を書き終えた時期には、その加速器を用いる実験についてできるかぎりの資料収集・机上演習を重ね、万遺漏なきを期するものであるが、完成後の実際が予想のとおりだった例はほとんどない。それは物理学者たちの怠慢のせいでは毛頭ない。実験技術の進歩があまりにも速く、また新しい現象の発見や物理の問題点の進展があって、そのために5～6年後の実験の実態をまちがいに予想せよということ自体が無理な注文なのである。われわれは、未来を卜することの困難さを学問の健全さを表わす証拠として、むしろ誇っていることだと信じている。

この事態は、世界一をきそう高エネルギー加速器を計画するときに顕著に現われる。頭をなやます事項が数多くあるなかで、加速器のエネルギーをどう選定するかをとりあげてみよう。素粒子物理だけの要請からいえば、エネルギーは高いほどよいにきまっている。強収斂型陽子シンクロトロンをとれば、1,000 GeV 級のものまで現在の技術で建設可能なことがわかっている。そこで、数十 GeV と 1,000 GeV あたりの間で、質的に判然とした物理現象の上での差のあることが明らかであれば、加速器のエネルギーを新現象出現をもとに定めればよからう。今のところ、多くの努力にもかかわらず、学問的にそのような特定エネルギーをいいあてることはできない。しかもエネルギーの大きさが、加速器を含めた全研究施設の費用に直接効いてくる（たとえば西ヨーロッパの300 GeV 計画は約1,500億円かかる）。そこで、高エネルギー計画立案者たちはきわめて厄介な事態に直面せねばならぬ。すなわち、物質の窮極構造を明らかにするための高エネルギーへの要求と、費用からみてエネルギーをおさえなければならぬ制約との間に妥協点を見出すことである。

高エネルギー計画は、不幸にも巨額の費用を要するために、国の科学政策のなかで特に検討すべき対象の一つになる。計画推進者たちは、学問技術のみならず、このような面へも配慮しなければならぬ。それと同時に、外国の高エネルギー計画との相溶性・競合などを考えねばならぬ。これらの諸点を総合的に検討して、その国の人的・工業的能力をもとに、加速器のサイズを含めて高エネルギー計画を決定するということになる。

カリフォルニア大学のベバトロン(6 GeV 陽子加速器、1954年完成、1963年改造終了)では、反核子がつくれるという明白な目標のもとにエネルギーを定めた。この意味では、エネルギー決定は例外的にやさしかった。CERN や BNL の 30 GeV 級のものは、主として経済的理由からエネルギーがきめられた。わが国の「素研」の加速器でも、超大国でない日本の事情をよく考えねばならぬ。

加速器ができてからの状況がいかに変貌するかについては実例を見るのがはやくからう。CERN や BNL のシンクロトロンが設計中の頃といえば、現在の測定器の花形である放電箱や泡箱がうぶ声をあげた前後であって、現在のような大きな力を発揮するとは予想されなかった。1953年に試験管くらの大きさだった泡箱と、ちかくアルゴン国立研究所に完成する直径12フィート、容積 27m³ の水素泡箱を比べてみればよい。装置の有効性が技術の急速な開発を促して、このような発展を可能ならしめたのである。電算機を駆使する情報処理や超電導磁石など同じようないちじるしい進展が数多くあった。

加速器は建設にかなりの年月がかかるので、つくり始めたらもう大きな変更は困難である。建設途中に、より安く有効な高エネルギー加速器をつくる方法が登場してきて、大変な無駄をしていることになりはしないか。打ち明けていえば、これは加速器建設にたずさわる者にとっていつもつきまとう心配である。このような例は、進歩の速い技術部門では決して珍しくないはずである。ドブナのシンクロファントロン(10 GeV、1957年完成)は強収斂原理以前の設計をもとにつくられ、その電磁石重量は強収斂をとり入れた CERN、BNL のものの10倍であ

る。時期的にドブナは不幸で、CERN, BNL は幸運であった。今のところ electron ring accelerator のごとき面白い加速方式が問題になっているけれども、在来のシンクロトロンにとってかわるまでには相当の年月を要しよう。「案研」の計画や米欧の 200 GeV, 300 GeV の計画が順調に進められるのであれば、安心して強収斂型シンクロトロンの案に進むべきだと判断する。

大加速器の完成後それを使いこなし、一応の仕事をなしとげるのに、加速器建設に要した程度の年月がかかるとは。この間の学問の進歩と技術革新をふまえて、次にすべきことが次第に形をととのえてくる。そして学問上、技術上どんな実験を重要視してゆくべきかに応じて、加速器および周辺施設・測定器に対する具体的な計画がたてられる。加速器についていえば、現在稼働中のもの大改造の形をとることもあろうし、新しいものの建設の提案となることもあろう。また研究者の要求に応じきれないので、現在の加速器の姉妹器をなるべく早くつくろうという場合もある。

新たにエネルギーまたは強度の格段に大きな加速器をつくる場合には、先に触れたように、建設後の研究状況を明確に予知することが困難なのだが、改造案や姉妹型建設のときにははるかによい精度で細かな点まで計画できる。わが国の「案研」の場合は、日本では初めてとしても、すでに二つの 30 GeV 級のものが経験を重ねており、ソ連の 70 GeV による実験も始まることだから、参考になる材料が豊富に得られる。BNL や CERN の陽子シンクロトロンは、やがて大改造を行なって、陽子線の強度を現在の 10 倍以上にするはずである。これまでの経験から、これらの加速器には、それを用いて研究すべきことが数多くあり、まだまだ多くの潜在力が内蔵されているものだから、このような大手術を行なうのである。大改造をすませたとしても、なお加速器利用者の要求があまりにも多くて、速やかに行なわれるべき高エネルギー実験さえマシン・タイムの絶対的不足のために遂行しきれないので、どこの国（先進国）でもさらに高エネルギーの新加速器をつくるべく全力をあげている。西欧の国々や日本も、できるだけ高エネルギーへゆきたいのだが、一つの国でまかない得るものとして数十 GeV のものをつくりたいというのである。

8. 高エネルギー物理への三つの“手”

素粒子物理にとって、さらに微細な物質の構造をさぐるために、できるかぎり波長の短い粒子線が必要とされる。量子力学によれば、粒子線の波長は運動量（光速に近ければ、 $[\text{運動量}] \times [\text{光速}]$ はエネルギーに等しい）に逆比例するから、素粒子の研究に高エネルギー加速器の必要などはあまりにも明らかである。そのほか、今までに見出されていない粒子があるとすれば、それは質屋が

大きくてこれまで人工的に作り得なかったと考えるべきであろう。また高エネルギーになるほど、宇宙線を用いてその現象を垣間見ているにもせよ、われわれのもつ知識は急速に少なくなる。そういったわけで、加速器のエネルギーに関しての世界的な競争が起こってくる。それはもっとも素人わがりのする方向といえるであろう。

もう一つの行き方としては、エネルギーの高さで競うことなく、粒子線の強度・性能を向上させて、波長の短からざることを実験の質で補うというのがある。すなわち、きわめて精密な実験をするとか、頻度はとても少ないが物理的に意義の高い現象を追求する、というわけである。先駆的な“高エネルギー”の嵐の後をうけて深く広く反省しつつ、専門外からみても華やかさに欠けるかもしれないが、物理への貢献度は“高エネルギー”にいささかもひけをとらないという道がある。低エネルギーの原子核物理の実験は、この方向でめざましい進歩をとりつつある典型的な例といえよう。CERN や BNL のシンクロトロン改造は、70 GeV や 200~300 GeV の出現を前にして、この方向への切りかえをねらったものである。さらにここに附記すべき事柄として、低（ないし中）エネルギーの中間子線や核子線を用いる物理で、この方向への発展がはじまった。それは meson factory の建設開始である。

meson factory とは、数百 MeV ないし 1 GeV の大強度陽子加速器（separated orbit cyclotron または 線型加速器）をつくって、強度の格段に強い核子線を得、またそれより大量の π および μ 中間子線を発生させようとするもので、meson（中間子）factory の名はそれより出た。これらの粒子線を用いて、核物理、素粒子、原子物理から、医学生物学的応用に至るまで、幅広い研究をしようというわけである。スイスとアメリカでこの方向の加速器がつくられはじめている。カナダにも pion factory (1 GeV, 65 mA) をつくる計画がある。

本格的な meson factory（ゆくゆくは数十 mA<ミリアンペア>以上の陽子線をねらう）は原子炉なみの放射線源となる。それで、加速器とその周辺装置の運転や修繕にあたって遠隔操作およびハンドリングの用意が必要であり、厳重な放射線対策をせねばならないために、今後の開発に待つべき要素が多い。先進国で meson factory よりも高エネルギー加速器への動きのほうが先行するのは、物理学の要請のみならず、このような技術的な要因がからんでいる。また、これまでの経験によれば、加速器をつくるに当たって、エネルギーは計画どおりに出せるのだが、予定の強度を出すのは大変困難である。強収斂型陽子シンクロトロンは、予想以上に強い強度が出せた稀にみる例であった。

また十数 GeV の大強度陽子加速器は K 中間子 (kaon) やハイペロンの大量生産ができるので、kaon factory と

よばれることがある(名前だけで実物はまだできていない)。これとの対比からいえば、上に述べた meson factory は π 中間子と μ 中間子を量産するので pion factory というほうがよい。

高エネルギー粒子を標的にあてて生ずる諸現象を調べるのが通常の高エネルギー実験といえようが、このときには終状態の重心運動に入射エネルギーが多く食われてしまつて、有効な(重心系での全)エネルギーは入射粒子のエネルギーの平方根に比例してしか上昇しない。そこで第三の“手”が出現した。それは二つの高エネルギー粒子線を高度の真空中で正面衝突させようという colliding beam machine である。ローレンツ変換よりすぐわかるように、これは高エネルギーをつくりだすのにきわめて有効で(第1表参照)、その着想は10年以上前にさかのぼる(アメリカ中西部大学連合[MURA]グループ)。それが電子線・陽電子線(e^-e^+)を用いて実現されたのはほんの数年前のことである。実現に至るまでに多くの難点を次々に克服せねばならず、長く苦しい努力が払われた。この第三の道の開拓者は、スタンフォード・プリンストン両大学の連合チーム、イタリア(ローマ近郊、ぶどう酒の産地であるフラスカッティの原子力研究所)、ソ連である。CERN、フランス、アメリカの他の研究機関もこれにつづいていて、第2表に世界の colliding beam machine の一覧表を示した。ソ連は大変な興味を示していて、ここにのせなかつたものがまだ少しあるようだ。

特に雄大な企画としては、CERN の 28 GeV 陽子線を 15° の角度でぶつつけさせる装置(Intersecting Storage Ring, 略してISRと呼ばれる)とノボシビルスクの 25 GeV の陽子を 25 GeV の反陽子に衝突させる計画があり、ともに建設中で1971~72年に完成する予定である。CERN

のISRは建設費が300億円に達するもので、ほぼ1,700 GeVの陽子を静止した水素標的にあてることに相当する。もし1,700 GeVの陽子シンクロトロンをつくるとすれば、加速器の建設費だけでも5,000億円の程度となろう。colliding beam machineが、超高エネルギー現象を人工的に比較的“安価”に実現するものとされる所以である。

このように、超高エネルギーに圧倒的な威力をもつ colliding beam machine にも泣きどころがある。それが粒子線同士の衝突なので、高エネルギー反応の起こる確率が小さいことのほか、なんといってもそれはそれだけで大規模な“一つ”の実験にすぎないという点にある。大加速器であれば、加速された粒子のみならず、それよりつくった種々の高エネルギー粒子を多種多様な実験のために、必要に応じて用いることができる。したがって、素粒子物理にとっても、また多くの実験家に役立つということから見ても、大加速器がどうしても不可欠であり、さらに余力があれば colliding beam machine をつくるといのがよい。

ノボシビルスクは、よそのまねをしないで独特の器械をつくるので定評がある。そこにはいくつもの colliding beam machine がそろいつつあり、特に 25 GeV の $p\bar{p}$ machine は毛色のちがった設計で、CERN のISRよりずっと安くつくっている。CERN のISRを含めて、一般に共同利用の装置をつくるからには、確実に完成し安定した運転のできることが至上命令となる。そこで安全度を十分にとり、したがって高くつくことになる。ノボシビルスクはシベリアの学術・工業の中心であり、その原子核研究所では機械製作によって得た純益を colliding beam machine 建設のごとき研究投資にふりむけ

第1表 (a) $e^\pm e^\mp$ の colliding beam machine

入射電子のエネルギー (E)	エネルギー E の電子を静止した電子にあてたときの重心系のエネルギー (U)	エネルギー E の二つの電子線を正面衝突させたときの全エネルギー ($2E$ に等しい)	静止した電子に衝突させて重心系のエネルギーを $2E$ にするために必要な電子のエネルギー
500 MeV	22 MeV	1 GeV	980 GeV
1.5 GeV	39 MeV	3 GeV	8,800 GeV
3 GeV	54 MeV	6 GeV	35,000 GeV
註	エネルギー E の加速器を用いる ee 衝突の場合 $U = \sqrt{2m_e c^2 E}$ (m_e = 電子質量, c = 光速)	colliding beam machine の場合	左の colliding beam machine に等価な電子加速器のエネルギー ($2E^2/m_e c^2$)

(b) $p\bar{p}$ または $p\bar{p}$ の colliding beam machine

入射粒子のエネルギー (E)	colliding beam machine のときの全エネルギー(正面衝突として) ($2E$)	重心系のエネルギーを $2E$ にするのに必要な陽子加速器のエネルギー	註
12 GeV	24 GeV	300 GeV	
28 GeV	56 GeV	1,700 GeV	ISR は正面衝突でなく、 15° でビームが交叉するよう設計されている
300 GeV	600 GeV	180,000 GeV	

るという（ソ連はもちろん世界的にも）稀な形態をとっている。それでノボシビルスクでは思い切って安く、しかも自称成功率80%（外国の専門家をもっと低くみつもる）の技術的冒険を敢行して、この colliding beam machine をつくっているのだ。世界的にも類のない傑作な研究所として西側の注目を受けている。

9. CERN について

西ヨーロッパでは戦後の復興計画の一つとして、科学をアメリカ、ソ連の巨大国に独占されないための努力が払われた。戦後の高エネルギー物理は二大国の独擅場になってしまった観があったので、指導的な物理学者たちはヨーロッパ諸国の協力により米ソに対抗する高エネルギー研究所をつくる運動をはじめた。それはまた有能な科学者の海外（アメリカ）流出を防ぐためにも必要であった。数年にわたる努力が実をむすんで1955年 CERN (European Organization for Nuclear Research, 欧州原子核研究所) がスイスのジュネーブ郊外、メイランの町に生れたのである。しかも CERN の正式発足以前から、高エネルギー加速器についての準備作業がはじめられていた。それが CERN のもつ二つの陽子加速器、600 MeV のシンクロサイクロトロン (1957年完成) と 28 GeV の陽子シンクロトロン (1959年完成) として実をむすび、西ヨーロッパの高エネルギー研究の中心として大いに役立ったのである。

CERN は西欧 13 国（発足当時は12カ国）が国家間の

* 東ヨーロッパの国々にも参加のよびかけがあったが、それに参加しないで、東側の国々の (CERN とよく似た方式で運営される) 国際的な研究機関として、モスクワ郊外ドブナに共同原子核研究所 (Joint Institute for Nuclear Research) を1956年に発足させた。ここは高エネルギーにかぎらず、核物理、中性子物理、放射化学などの研究が行なわれている。

条約にもとづいて共同出資、共同運営を行なう研究所である。費用は国民総所得に比例して出し(第3表)、その比率は3年ごとに改訂される。国際的な研究所として好評であったので、宇宙科学や生物学においてもヨーロッパの国際的研究機構が CERN につづいてつくられた。

ここで、CERN の機構や人員構成などについて若干述べておこう。

CERN にいる広義の高エネルギー学者（加速器・測定器の専門家や理論家を含む）はおおよそ500人（そのうち陽子シンクロトロンを使って高エネルギー物理実験をしている物理学者に限れば約100人）であるが、回路・工作・低温・営繕などのサービス部門に多くの人員をかかえているので、今や二千数百人の大世帯である（1968年3月現在で2,350人、その他に客員研究者が400人以上きている）(第4表)。この大きな機構を円滑に運営するのはなみなみならぬことであり、そのうえ国際機関であるから、人員の配分や研究面、物品設備の発注購入などのあらゆる面において加盟国間に不平等のおこらぬような配慮がある。人員の増加につれて万事細分化し、いわゆる官僚化する傾向は否めないが、一般的にみて非常によく運営されているといえよう。CERN の内部構成は第1図に示したとおりである。

CERN の研究計画の大綱や重要人事、予算は理事会 (CERN Council) が決定承認する。任期3年の所長をきめるのも理事会の仕事である。各加盟国より物理学者と事務系の理事をそれぞれ1名ずつ出して理事会が構成され、年間に2~3回会合を開く。物理関係の理事は、CERN の初期には高エネルギー学者でない人が多かったが、最近では広義の高エネルギー関係者の割合がふえてきた。事務系理事は、各国政府（日本流に言えば、文部省、大蔵省、外務省、科学技術庁の範囲といえようか）の高級職員があてられている。それは各国政府と友好的かつ緊

第2表 colliding beam machine 一覧表

機	種	完 成	粒 子	エネルギー (GeV値)	注
イタリア	フラスカッティ (Ada)	1961	e^+e^-	250 MeV	もう使用されない。 $e^-+e^+ \rightarrow e^-+e^++\gamma$ の実験
ソ連	カルコフ	1963	e^-e^-	100 MeV	
ソ連	ノボシビルスク (VEPP-1)	1963	e^-e^-	130 MeV	
アメリカ	プリンストン・スタンフォード	1964	e^-e^-	500 MeV	e^-e^- 散乱実験 (量子電気力学の適用限界)
ソ連	ノボシビルスク (VEPP-2)	1966	e^-e^+	700 MeV	$e^-+e^+ \rightarrow \pi^++\pi^-$ の実験 (ρ^0 中間子の研究) (1967)
フランス	オルセイ (ACO)	1966	e^-e^+	500 MeV	$e^-+e^+ \rightarrow \pi^++\pi^-$ の実験 () (1967より)
アメリカ	MURA	1967	e^-e^+	200 MeV	
イタリア	フラスカッティ (Adone)	1967	e^-e^+	1.5 GeV	目下調整中
アメリカ	MIT・ハーバード大学		e^-e^+	3 GeV	1966年よりテスト。CEA を colliding beam 用に使う計画
ソ連	ノボシビルスク (VEPP-3)	(1968)	e^-e^+	3.5 GeV	建設中
ソ連	ノボシビルスク (VEPP-4)	(1971)	pp	25 GeV	建設中
スイス	CERN (ISR)	(1972)	pp	28 GeV	建設中。15°で二つの陽子線をぶっつけさせる。電子加速器を追加すれば、4.5 GeV ee 衝突や ep 衝突にも使える
西ドイツ	DESY		e^-e^+	3 GeV	計画
アメリカ	スタンフォード		e^-e^+	3 GeV	計画

VEPP4 6 GeV e^-e^+ にしようか。

第3表 CERN への分担金の比率 (1966年) (この表の13ヶ国が現在の加盟国である。発足当初、オーストリアとスペインは参加しておらず、現在加盟していないユーゴが加わっていた)

加盟国	CERNへの分担金の比率	ISR 建設費への分担金および300 GeV 準備費への分担金の比率 (この二つは同じ比である)	国民所得総額 (1965年) (億ドル)
オーストリア	1.90%	1.91%	70
ベルギー	3.56	3.59	134
デンマーク	2.05	2.06	79
西ドイツ	23.30	23.44	854
フランス	19.34	19.46	708
ギリシャ	0.60	—	41(1964年)
イタリア	11.24	11.31	456
オランダ	3.88	3.90	156
ノルウェー	1.41	1.41	54
スペイン	3.43	3.45	154(1964年)
スウェーデン	4.02	4.04	170
スイス	3.11	3.13	116
イギリス	22.16	22.30	790
総計 152×10 ⁶ スイスフラン=125億円		両者の合計約20億円 (ISRの総経費は300億円、300 GeVの総経費は1,500億円と見積られている)	日本 682 アメリカ 5,590

密な連絡がとれ(特に CERN の予算が保障される)、この大きな機関の運営・管理に明るい理事が必要とされるからだ。また、この理事会は二つの部会をもっている。一つは物理関係理事で構成される科学政策委員会 (Science Policy Committee) で、もう一つは事務系理事よりなる財政委員会 (Finance Committee) である。前者は CERN で行なわれる高エネルギー研究 (1年間の研究計画・長期計画や物理関係の重要人事などを合めて) に関して専門的な立場から原案を作り、後者は名の示すとおり事務・予算関係を担当する。

高エネルギー実験の提案を集め、それらを検討し、実行すべきテーマをきめるのに、CERN 所員と加盟各国の学者よりなるいくつかの委員会がある (エレクトロニクス実験、泡箱実験、写真乾板などについてそれぞれに委員会ができている)。科学政策委員会には European Committee for Future Accelerator (委員長であるローマ大学のアマルディ (Amaldi) 教授の名をとって、ふつうアマルディ委員会または単に ECFA とよばれる) がついている。西欧各国の高エネルギー計画は大学や高エネルギー研究機関で自主的に進められるのだが、各国の計画を調査し、その間の調整や適当な勧告を行なうこと、また西欧共同の大きな計画である 300 GeV 計画の総まとめ役がこのアマルディ委員会の仕事である。

CERN の陽子シンクロトロンを用いるエレクトロニクス実験の種類は年間に20以上を数える。各々の実験は物理実験家数人~十数人を中心とし、技術者・技術補助員を含めた大きなチームで行なわれる。実験チームのおおよそ半分は CERN 所員 (および客員研究者) のチームで、約4分の1が CERN と加盟国との混成チーム、残りが加盟各国より派遣されてくる visiting team となっ

ている。これらのエレクトロニクス実験では、小型電算機を実験装置に付属させ実験データを解析・集計する (いわゆる on-line Computer) 方式がめざましく進んでいる。このほかに、写真乾板を用いる高エネルギー研究や核化学的研究などが行なわれている。

CERN 自身のもつ泡箱としては (加盟国のもちこむものを除外しての語である)、10年ほど前にできた 32cm の小型泡箱 (今はほとんどつかわれない)、2 m (木素容積 1,650 l) の木素泡箱 (1960年完成) や 1.180 l の重液体泡箱などがある。年間約20種類の泡箱実験が行なわ

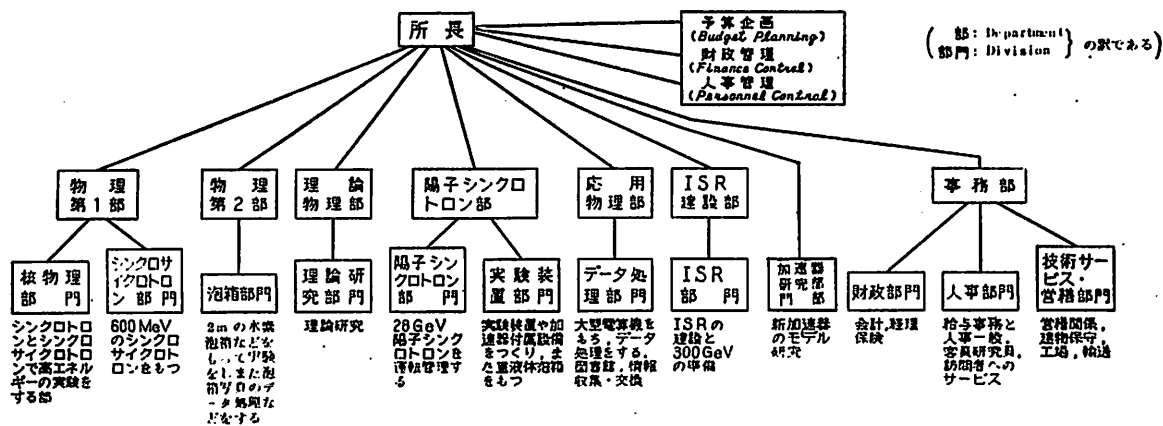
れ、総計 500 万枚 (1967年の実績) の泡箱写真がとられている。写真の1/4~1/5が CERN で解析されるだけで、残りの大部分は加盟各国の大学・研究機関に送られて研究される。このフィルムを人力で解析するのは不可能なので、高速大型電算機を必要とするのである。

10. アマルディ勧告

CERN の計画、発足がみられた 1950 年代前半には、30GeV クラスの大加速器は、米ソ超大国なら一國でつくればよいが、西ヨーロッパでは費用の点からみてどうしても国々の協力でつくるほかはないと考えられた。そしてそれぞれの国は国内に小型 (数 GeV ないしそれ以下) の加速器をもって国内の高エネルギー研究活動を高め、CERN の陽子シンクロトロンを国際的に利用するはずであった。

ところが1960年以後になると、ヨーロッパの科学、とくに高エネルギー物理はますます盛んとなり、研究者層が厚くなり、このままではヨーロッパの高エネルギー研究施設の絶対的な不足が心配されるようになった。そして国内用として十数 GeV のもの、国際的なものとして数百 GeV のものをつくらうという計画がもち上がった。その背景には各国の国力の伸びがいちじるしく、多くの学問分野への投資増と相俟って、このような大計画が十分に正当化されようとの判断があった。さらに科学の故郷ヨーロッパの科学の栄光を米ソのリードからとりもどそうという強い意欲も見のがすことができない。先に述べたアマルディ委員会はこの気運の上につくられ、高エネルギー計画の行司役・指南役としての作業を開始するのである。

1963 年に出されたアマルディ委員会の報告には、ヨ



第1図(a) CERN の内部構成

ヨーロッパ諸国の協力により行なう大型計画を頂上計画 (Summit Programme), CERN 加盟各国の国内での高エネルギー計画をピラミッドの底辺計画 ("Base of Pyramid" Programme) と名付けている。いい得て妙な表現である。頂上計画としては、ヨーロッパの高エネルギー物理の飛躍的發展をはかるために、(a) ISR と (b) 300GeV 級の陽子加速器の建設を強く勧告した。これらはともに、人工的に作りだせる最高のエネルギー領域での研究をめざすものである。

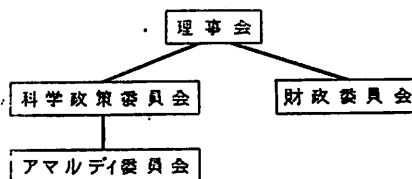
CERN 運営の経験より、頂上計画に採択された中心施設が真に十分に生かされるためには、参加各国の国内に高エネルギー研究活動の十分な基盤がなければならないことは明白であった。そこで、ヨーロッパ各国自身の高エネルギー施設の現状と計画とを調査し、頂上計画にみあうピラミッドの底辺計画を考えるべきだとした。そこで

- (c) 数百 MeV の pion factory
- (d) 10 GeV クラスの K 粒子, ハイペロン, 反核子の強大ビーム発生用の陽子加速器 (kaon factory)
- (e) 10 GeV までの高エネルギー電子加速器

を国家計画 (national project) として推薦した。

これら国際的および国家的計画をたてるにあたっては、全体としてのバランスを十分配慮すべきことを強調している。実のところ、この勧告はイギリス、ドイツなどで数 GeV の電子加速器の建設中の時期に行なわれたので、現状追認の色彩が濃厚であったことは否めない。(c), (d) は新しい方向を打ち出したものである。

この1963年の勧告のなかで、底辺計画の実現は当時建設中のものをのぞくと決してかんばしいとはいえなかった。ボン(西独, 2.5GeV 電子シンクロトロン), チューリッヒ (600MeV



第1図(b) CERN の理事会

の強度の強い陽子加速器) ができたくらいのものである。スカンジナビア諸国の連合で 10 GeV クラスの加速器をもつ高エネルギー研究所をつくらうと学者が熱心に運動した。政府側は大いに興味を示したが、もっと安いものではないかと出たので、この計画は休止状態となってしまった。

ドゴールとアデナウアーが仏独に君臨した両国の蜜月時代には、ラインのほとりに両国共同で数 GeV 加速器 (カロリゲン加速器とあだ名された) をつくるというムードがあったが、それもアデナウアー退陣後消え去った。

大加速器ではたいしたうごきは見られなかったにもせよ、加速器よりのビーム取出し, 粒子選別, 泡箱などの測定器やデータ処理の発展はめざましく進行した。

わが国の「案研」計画は 12GeV, 0.1μA を超える陽子加速器を中心とするものとして、1950年代の末につくり上げられ、1962年の学術会議の対政府勧告となり、1964年

第4表 CERN の人員の比率

	1966年	1965年	註
scientists and engineers	413人	349人	博士またはそれに相当するもの
technicians	717	604	技術員
administrative staff	373	316	各部配属の秘書やタイピストも含めた事務系
craftsmen and service personnel	800	758	特殊技能者, サービス要員
laboratory staff	187	164	
fellows and visitors (年間平均)	285	235	長期・短期間 CERN にきて研究するもの
計	2490	2191	

には 40 GeV 陽子シンクロトロンを中心とした計画に変更された。これは「素研」計画の発足が遅れたので、時間的にはやくでき、しかも実験に使いやすい加速器という点を考慮したことによる。この日本の計画は、西ヨーロッパにはねかえった。西独、フランス、イタリアが十数 GeV をひっこめて、40~60 GeV クラスの計画を打ち出してくるのである。

ここに比較のために、1960年代のアメリカの頂上計画を附記しておこう。BNL の陽子シンクロトロンをつくったグループを中心に、アメリカ東部の研究者が 300~1,000 GeV の陽子シンクロトロン建設を提案したのが 1961年であった。これに対抗して、カリフォルニア大学のローレンス輻射研究所は 100 GeV 以上の陽子シンクロトロン建設をとらえた。このころソ連も数百~1,000 GeV のものへ興味を示していた。アメリカの東・西部の推す二大加速器案はしのぎを削ぎあって先行をあらそったが、やがてアメリカとしては単独で 100~200 GeV のものを作ることにし、米ソもしくは米ソ欧の大陸間連合 (intercontinental collaboration) で 1,000 GeV 級のものをつくろうではないかという気運になった。当時、アイゼンハワー・フルシチョフ、ケネディ・フルシチョフの米ソ友好ムードのもとに、物理学者間にこのような構想が芽生えてきたのであった。しかし、それも束の間、U-2 事件やキューバ危機によって東と西にまたがる大陸間連合の加速器建設の構想は空中に霧散してしまった。アマルディ報告の出た 1963年には、アメリカの学者は colliding beam machine をとらないで数百 GeV 加速器案をすすめることにした。1965年になると、詳しいデザイン研究をもとにカリフォルニア大学から 200 GeV シンクロトロン計画書が出されたが、ベトナム戦の暗い影で連邦政府の建設許可がなかなか得られなかった。この間きまったことはただ一つ、200 GeV をカリフォルニア大学のものとして、国立加速器研究所 (NAL) をつくって 200 GeV 加速器をおくことである。たまたまウィルソンはカリフォルニア案より安い 200 GeV 計画を発表して AEC の受け入れるところとなり、ウィルソンが NAL の所長に任命されて再び 200 GeV 新案のデザイン研究をすすめている。この辺のことは、前回 (6月号) に述べたとおりである。

NAL の 200 GeV 加速器を含む創設費は 2億 4800 万ドルで、これには高エネルギー実験のための費用は含まれていない。ウィルソンは次期の計画として、この加速器を 400~500 GeV にあげ得るように工夫をしている。

BNL と CERN の 30 GeV 級シンクロトロンはほと

* 研究費にとって大きな障害となっている。例えば BNL では高エネルギー関係の予算を得るにあたって、予算節約の実を示すため 1967年のクリスマス以降、同研究所のコスモトロン (3 GeV 陽子) の運転を停止した。

んど同時に建造をはじめたのだが、CERN は半年早く、しかも性能のいいものを完成させた。これによって、意気軒昂たる CERN の加速器専門家たちは ISR の建設をつよく推進し、高エネルギー物理学者の支持する数百 GeV 案を圧倒した。ヨーロッパの数百 GeV 計画は、発足するとき以来アメリカの後塵を拝しているようにみえる。

11. 西ヨーロッパの頂上計画

西ヨーロッパの頂上計画については、数年にわたる詳しいデザイン研究の後、300 GeV 陽子シンクロトロン (強度は 10^{12} 陽子/秒) と ISR につき 1964年に部厚い計画書が発表された。ISR に陽子線 (20Aが必要である) を入れるには、CERN のシンクロトロンの強度を 10 倍以上に強くなねばならぬ。また、ますます増大する高エネルギー実験の要求からも強度増強が望まれた。そのために陽子シンクロトロンの改造方式が盛んに研究された。

非常にむずかしい問題は、ISR と 300 GeV の優先順位であった。加速器屋にとっては、大型シンクロトロンよりも技術開発を伴う ISR のほうがはるかに興味もてるプロジェクトであった。ISR は 28 GeV の陽子線を衝突させる一つの実験にすぎず、それに対して 300 GeV のほうは非常に多くの実験を可能ならしめるので、実験屋の支持は当然 300 GeV に集まる。この点について多くの議論があったが、当時の CERN 所長であったワイスコップ (Weisskopf) の意向もあって ISR が先行することになり、その建設が 1966年よりはじめられた (1971年ごろ完了予定)。このような判断のもとには、ISR はきわめて高エネルギーの陽子・陽子衝突であるので、30~300 GeV 加速器では起こり得ない新現象を発見する可能性への希望がひそんでいた。アメリカが ISR に相当する陽子・陽子の colliding beam machine をまったく計画せず、200 GeV 計画の推進につとめたのは対照的であった。

陽子シンクロトロン改造と ISR は CERN の事業として遂行される。CERN の敷地は元来スイスより提供されたジュネーブ近傍フランス国境ぎわの 40 ha の広さで、そこへいやおうなしに現シンクロトロンをつくったのであった。ISR を作るために新しい土地が必要であったが、それはフランスが CERN に接続した土地 40ha を 99年かしてくることで解決した。1967年にはシンクロトロン強度増強の具体的な計画がかたまり、その作業も地についできた。

それに対し、300 GeV は新しい場所につくられ、新研究所のものとするようになる。CERN と 300 GeV 研究所とは単一の理事会のもとにおくこととされ、CERN の現理事会が 300 GeV 計画の重要事項を扱うことになっている。300 GeV 陽子シンクロトロン計画のすすみはまったく遅々としていた。それはアメリカの 200 GeV

計画ののろさに歩調をあわせたとしかいいようがない。アメリカはベトナム戦のあおりで大計画に手をつけるのが遅れた。

300 GeV についても、まず土地選定が厄介な問題であった。300 GeV を CERN またはその近くにつくることは敷地の点より問題外で、CERN 理事会は加盟国に敷地の提供を求めた。1964年6月までに加盟10カ国から22カ所の敷地候補の申入れがあり、その後1966年には9カ国計12の候補地に減らされた。CERN 理事会は今後これらのなかからまず四つを、次いで2/3以上の支持を得て敷地を決定するとともに、新研究所長を任命しなければならない。これらの重要決定を今年中にすませたいというのが現状である。

敷地の選定に対する各国の反応にふれておくのも興味がある。英仏独のごとき大国は、もちろん国内勝致を求めるのは当然であろう。しかし、小国は二通りの反応を示した。300 GeV の研究所は数千人の所員をようし、大量の工学者、技術陣を当該国より出すことになる。そうすると、小国にとってその産業界に大きな好刺激を得て有利だと考える国と、そんな大きなはねかえりは迷惑至極という国とがある。前者はベルギー、後者はデンマークに例がみられる。また大国にとって300GeV がくることは、当該国独自の高エネルギー計画を圧迫するにして

も、当該国への直接間接の利益はきわめて大である。敷地を立候補していない国（オランダ、デンマーク、スイス）の理事よりなる Site Evaluation Panel（俗に三賢人委員会とよばれる）が、最近いろいろな観点から九つの有力候補地に評点をつけたが、それをめぐって賛否両論が出、喧々囂々たる有様で、これからが見ものである。三賢人委員会は、(a)地形地質学的に300 GeV をもつ研究所に適しているかどうか、また研究所の敷地を将来拡張できるか否か、(b)研究所の運営に適しているか否か（冷却水・電力の需給、工業の中心との遠近、交通・運輸の便など）、(c)研究所員が近くに住んで快適に働けるか（住宅事情、教育施設、高等教育・研究所への遠近、文化環境、気候など）などについて詳しい検討をした。

300 GeV の正式発足には、大口出資者である西欧4カ国がそれを承認することが必要条件とみなされる。今までに300 GeV をやるべしと答えたのはフランス、ベルギー、オーストリアの3カ国だけで、イギリスと西ドイツの政府は今なお態度を明らかにしていない。イタリアの政府は、英仏西独の承認があればただちに承認すると答えている。

なお、次回では西ヨーロッパ諸国の底辺をさぐってみたい。

12. 西ヨーロッパの底辺計画

以上において、高エネルギー実験施設の発展のあとを概観し欧米の“頂上計画”を眺めて来た。“頂上計画”は頭じょうで広く根をはった“ピラミッドの底辺計画”に支えられてこそ成立つものである。今回は西ヨーロッパ諸国の高エネルギー実験物理学の状況をやや詳しく述べ、彼等の“底辺”の実体を明かにしたい。今迄に何度も強調して来たように、日本の高エネルギー計画の範は、米ソの如き超大国のそれに求めるべきでなく、西欧の大国（英仏独伊）に見出すべきものである。日本の「素研」の問題を日本のなかのものとして考えるばかりでなく、先進諸国の事情をふまえた上で“外から見た”立場からもよく考えていたと望みたいと思う。そういうつもりでこのシリーズを書き綴っているのである。

フランス

マンデス・フランスによってインドシナ戦争からフランスが手をひいて、生じた余力を科学にもふりむけた。こうして3 GeVの陽子加速器 (Saturne) がつくられた。その後しばらくたって60 GeV 加速器の机上案もあったが、大した支持もなく、CERNを有効につかうことや、パリ大学理学部 (オルセーにある) に1 GeV電子線型加速器をつくることなど、高エネルギーの研究活動が高められていった。そして次第にフランス独自の高エネルギー計画が真剣に考えられるようになった。

de Gaulle 治下のフランスは、彼の内政については異論が少くないが、外交政策・科学政策は意外に広く研究者層の心をつかんでいた。彼の偉大なフランス再建の方針は、積極的な科学政策の実施となって現われた。de Gaulleはアルジェリア独立の代償として軍に原水爆なるオモチャを与えて政治に介入するひまがないようにした。フランスの学者とくに原子核研究者はこぞって原水爆製造に反対したが、軍は独自の力でそれをすすめた。それにも拘わらず de Gaulleの科学政策はゴーストをこえて学者の心をつかんだし、フランスの産業をアメリカ一辺倒より独立させる方向へも着々と手をうとうとした。この背景の中で高エネルギーの計画が組上りにのぼるのは当然のなりゆきである。

フランスでは1965年、科学5ケ年計画の一つとして、総額 235×10^9 フランスフランで15 GeVの電子加速器をつくることにきめた。それは1966~1970にわたって建設されるはずであった。この決定の背後にはCERNの陽子シンクロトロンとの競合をさける配慮があり、フランスの指導的な高エネルギー学者6人からなる委員会が決断し政府に勧告した結果であった。しかし電子の加速器はごく限られた素粒子実験——それはそれとして有用であるけれども——しかできないことから、フランスの中堅の物理学者の支持を失った。その結果電子加速器を45 GeVの陽子シンクロトロンに計画をかえざるを得なくなった。それにあたって日本の40 GeV計画も無視し得ない因子となったと推察する。この器種変更

とそれにもなり追加予算(約2億フランスフラン)を政府にみとめさせることが、フランスの高エネルギー物理学者たちの直面している問題である。

ここに生ずる大問題はしばしばふれた西欧連合で作る300 GeV加速器との優先順位である。フランスが先にnational machine建設にふみ切れば、300 GeVはおくれざるをえない。そこでフランスより出ているCERN所長Gregory等の意向はまず300 GeV建設を先行させ、次いでフランスの加速器をつくりたいとしている。この考えは広い支持をえている。

フランスは泡箱の開発と建造において非常に大きな貢献をしてきた。CERNの現所長もフランス泡箱チームの有力メンバーの一人であったし、CERNのTrack Chamber部門のほこる2 m水素泡箱(総工費約15億円)もフランス組を中心に完成したものである。フランス国内はいりまでもなくCERNやドイツ等で稼働中の泡箱にもフランス製のものが少なくない。(我国の泡箱製作にもフランス側情報が役立っている)。その意味でフランスは泡箱の生れ故郷アメリカと並ぶ泡箱工業国である。

運転中の主な泡箱としては81 cmの水素泡箱(CERNで運転中)、180 lの水素泡箱(イギリスのラザフォード研究所で運転中)、300 lの重液体の大型泡箱(パリ近傍のSaclay原子力研究所にある)がある。更にフランスでは大型の泡箱の建設にとりくんでいる。第一に6 m³の水素泡箱(Mirabelleとよばれる)が完成間近で、ソ連のSerpuukhovの高エネルギー物理研究所(70 GeV加速器をもつ)で仏ソ共同で使うことになる。これはフランス・ソ連の間の高エネルギー研究に関する文化協定の一環である。次に通称Gargamelleとよばれる12 m³の(直径1.92 m、長さ4.6 m)重液体をつめる泡箱があって、1969年完成予定。その使命の一つはCERNの陽子シンクロトロンが強度増強をした後中性微子反応をみることにある。第三にフランスと西独、CERNが夫々費用の½づつを負担して、共同製作をしようとする超大型の水素泡箱のプランがある。デザインと基礎研究が終ろうとしている段階であるが、液体水素30 m³をのみこむマンモス型で総経費は60億円を下るまい。材料、低温施設、光学系等新しい問題の山づみでそれを一つ一つ克服してゆかねばならぬ。このような野心的な計画はアメリカにもあり、両者のせりあいがみものである。

フランスで稼働中の大加速器としては、先きのべたようにSaclayの原子力研究所にある3 GeVの陽子加速器(Saturneという)、パリ大学理学部(Orsay)にある1.3 GeVの電子線型加速器(1961年完成)、400 MeVのe⁺e⁻のcolliding beam machine(ACOと略称、1965年完成)などがある。更に1 GeV級のduty cycleのよい(5%をねらう)電子線型加速器を作るといふ。

フランスの(狭義の)高エネルギー実験グループについてみると、まず泡箱関係では物理

学者約150人が中心となって活躍しており年間100万枚の泡箱写真解析能力をもつ。エレクトロニクス実験も強力に進められて6~7組ができており、その他に約3組がCERNにてかけて実験している。

このようにフランスは西欧大国の中で、高エネルギー物理の今後の発展が最も期待される国である。

西ドイツ

その華やかな工業力のわりに高エネルギーの活動は小さかった。それはナチス治下に大量の有能な学者を失い、学問的活力が大幅に下ったこと、敗戦後原子核とくに高エネルギー研究の復興がおくれたことに由る。更に理論優勢で、実験研究の軽視が上層の物理学者にみられたことも大きくわざわざいしたと思われる。

ドイツが高エネルギーに本格的に足をふみ入れるのは(CERNへの協力をのぞけば)1960年に入ってからである。

特にハンブルグ大学では、Jentschkeがわずかな基金をもとに6 GeVの電子シンクロトロン(DESY; Deutsches Elektronen-Synkrotron)の建造をはじめ、その後連邦政府よりの資金を確保するのに成功して1964年同シンクロトロンの完成をみるにいたった。彼の大バクチが見事成功したわけである。これはアメリカのMITとハーバード大学が共有するCambridge Electron Accelerator(CEA, 6 GeV)の後を追うようにしてできたもので、加速器の開発・デザインはCEAのものを最大限に利用し、質はドイツの伝統にものをいわせてアメリカにまさるものとするという意気どみでつくられた。その後、この加速器に3~4 GeVの e^-e^+ colliding beam machineを追加したいと計画しており、政府の最終承認をまたないでそのビーム輸送系などの建設をはじめている。

ボンには500 MeVの電子シンクロトロンがあったが、1967年に2.3 GeVの電子シンクロトロンを完成させた。

カールスルーエでは1966年より3年計画で加速器の開発研究をしている。CERNで加速器建設、高エネルギー実験に大きな力を発揮した人々が主力となっている。このチームは、ドイツの中心的な高エネルギー加速器を設計するのが本務で、はじめ超電導陽子線型加速器の開発研究に力を入れたが、最近では40~60 GeVの陽子シンクロトロンを提案している。フランスの項でのべた超大型水素泡箱の西独側協力チームもカールスルーエにいる。

泡箱関係では、DESYに80 cmの水素泡箱が働いているほか、物理学者・大学院学生をふくめて190人近くが約6組にわかれて写真解析を行っている。また数組のエレクトロニクス実験チームがCERNで実験をしている。字

ようやくドイツも国力にふさわしい高エネルギーの活動をはじめそうに見える。ドイツは

西欧の大国、英仏、と並べると見劣りするが、日本に比べれば問題なくよい状態にある。また300 GeV計画にまだイエスと答えていないのは、西ドイツ派遣の理事が改選され事情に通じていなかったからだ。300 GeVはもう船出したも同然と思われ、ドイツの40~60 GeV計画とDESYにつけるべき e^+e^- のcolliding beam machineなどドイツ国内の高エネルギー問題に気をとられすぎたためだと聞く。

西ドイツではこの頃大学の拡張が急ピッチで進められている。ことにモスバウアーの帰国後の大学の近代化にめざましいものがある。

西欧の300 GeV計画、西ドイツ自身の40~60 GeV加速器、ハンブルグのColliding beam machineの優先あられは中々厄介な問題となろう。

イタリヤ

戦後イタリアの高エネルギー物理学者のアメリカ進出は実にめざましいものであったが、1959年にイタリアはローマ郊外Frascatiの原子力研究所内に、1.1 GeVの電子シンクロトロンを完成させた。アメリカと比べてそうおくれなれなかったのも、この程度の電子加速器の中でも、実によく実験をした機械である。イタリアは国力を考えて、陽子加速器でなく安価な電子のものをえらび、これで国内の高エネルギー研究と研究者の養成には十分とその当時考えたのであった。そして電子シンクロトロンにつづく国家計画としても、陽子加速器をねらうことなく、独自の案——しかも安く有意義なもの——をねらった。たまたまプリンストン・スタンフォード両大学共同の e^-e^- colliding beam machineの構想の出たころ、イタリアは e^-e^+ colliding beam machineを高エネルギーの国家計画の柱とした。 e^-e^- でなく e^-e^+ としたのは、実に先見の明である。両者ともいわゆる量子電気力学の適用限界をほり下げてゆくのに有力なものであるが、 e^-e^+ は更に両者が消滅して多様な反応、とくにhadron群をつくり出すことも可能で、hadronの物理学にも大いに役立つ。このように e^-e^+ は e^-e^- に比べて研究できるテーマは圧倒的にゆたかである。そこでまずモデルとして350 MeVの e^- 、 e^+ をぶっつける小型のもの(Adaとよばれる)を作り、開発研究と経験をつんだ上で、1.5 GeVの e^-e^+ のcolliding beam machine(Adoneという)をつくることにした。Adoneは器械本体がすでに完成し、目下調整中である。

さて、イタリアは大量の学者をアメリカに出し又最もうまくCERNを利用する国である。それに刺激されて高エネルギー実験家の増加は(とくに1960年に入ってから)著しいものがある。先にものべたようにcolliding beam machineは“大きなしかし、一つの実験”で多数の実験家の利用に供するわけにはゆかない。CERN及び将来の300 GeVを更によくつかい高エネルギー活動をすすめてゆくには、イタリアが独自の高エネルギー施設をもつべきことは益々明らかになってきた。そこでPisa大学等のチームが中心となってイタ

リアの加速器——数10 GeVの陽子加速器——の机上プランをすすめていて、日本、フランス、西独につづいてゆこうという姿勢である。

イタリアはローマ大学のもつ20 cmのHe 泡箱の他には泡箱をもたない。しかしCERNやフランスの泡箱写真を大量に得てその解析を盛んに行っている。エレクトロニクス実験チームの数でも英仏に匹敵するものがあり、CERNをきわめて有効に利用している。

イタリアの近代物理学の復興はフェルミにはじまる。その後物理とくに高エネルギー物理は、化学等と並んでイタリアの科学振興の第一線に立ってすすめられてきた。例えば高エネルギー研究投資の増加は直ちに他の科学への有効な波及をみて、科学全体をすすめるのに寄与している。イタリアはしかし今日本とならぶ高速度成長のひずみもち、それに特有な南北の格差になやむ。更に数年前、物理学者間の不幸な対立があったりして、これまで高エネルギー計画の進展のテンポが速かったとはいえない。

しかしそれもヨーロッパの中での相対的比較である。Frascatiの1.1 GeVのシンクロトロンをみても、東大原子核研究所の1.3 GeV電子シンクロトロンよりずっとめぐまれた状況にあるし、国立諸大学の高エネルギーの活動は我々をうらやましがるに十分である。その上彼等はCERN(や300 GeV計画)に参加しているのだ。さらに、CERN設立準備にあたってイタリアの物理学者*の示した熱意をかえり見、また西ヨーロッパやアメリカでのイタリアの高エネルギー物理学者のめざましい活躍を思うとき、イタリア高エネルギー計画の今後の飛躍的展開も大いにあり得ることである。

ついでにふれておくのだが、西ヨーロッパでは国境をこえてヨーロッパ物理学会をつくらうという運動がはじめられた。それはベルナルディ教授(ピサのScuola Normale Superioreの学長)等が中心になって進められている。フィレンツェには“ヨーロッパ大学”がおかれているし、まえに述べたようなCERN発足におけるイタリアの物理学者の大活躍以来、イタリアは学問における汎ヨーロッパ運動を積極的に推進している。

イギリス

ロンドン近郊のラザフォード高エネルギー研究所はニムロドと名付けられた7 GeVの陽子加速器をもっている。また新設のダレスベリ核物理研究所(地理的配慮よりイギリス北部

* CERN発足に当って、EEC結成のときと同じく、イギリスはヨーロッパ大陸の外に超然とかまえ、最後までCERN加盟をしぶった。そのイギリスをねばり強く説得し、加盟へ引きずって来たのは、仏伊等の学者とくにアマルディ教授の功績である。加盟後イギリスはCERNの重鎮としておさまり、ラテン系諸国から時折アリアン(イギリスをさす)優越をささやかれたりした。CERNの事務長は伝統的にイギリスより出ることになっている。CERN発足前のイギリスのnegativeな態度と比べて、現実には皮肉なものである。

におかれた)に、最近5 GeVの電子シンクロトロン(ニナと呼ぶ)ができあがった。両者とももう少し早く完成していたら、もっとよく物理学に貢献したであろうと惜しまれる(日本の「素研」がイギリスの轍を踏まないことを祈る!)。これらの加速器については早くより計画が出来ていながら、上級の委員会、従って政府の決断が遅れたのが原因であった。これら2つの研究所は、最近大いに活躍しているので、余計そういいたいくなるのである。

偉大なラザフォードが逝ってから、宇宙線においては気を吐いたけれども、イギリスの高エネルギー実験物理学はよき指導者を得ず、さりとて(イギリス特有の身分・年齢の序列を重んずる風習のために)有能な中監層へのバトン・タッチもはかばかしく進まなかった。そのために穏健だが決断力に欠ける老学者先生の手によって高エネルギー政策がのんびりしたテンポで進められたという所であろう。日本はイギリスに似た所が多すぎるようだが、高エネルギー物理でイギリスのまねはしてもらいたくない。

今後5~10年間に、イギリスが国内の高エネルギー活動で大きな飛躍を見せるとは思われな。既にある2つの高エネルギー研究所を少しずつ改善しつゝ最大限に活用しようとしている。まずニムロドの強度増強(費用は50万ポンド)とそれに大型ストリーマー・チェーンを備えつける。次にニナを入射器とする15~20 GeVの電子シンクロトロン(約3百万ポンドかかる)を計画中である。

老大国イギリスの財政はいばらの道を歩み、CERNとISR建造に多額の支出をしている。更に300 GeV計画が発足すれば、イギリスは西ドイツと並んで最大の投資をせねばならぬ。イギリスの学者たちは、イギリス独自の高エネルギー大計画実現の可能性が乏しい現実にかんがみ、ヨーロッパ共同事業(とくに300 GeV)に大いに力を入れている。そして300 GeV計画が、西ヨーロッパ諸国の多数の支持を得られずに、難行する場合には、“日本でさえ40 GeVを考えている”のだから、独仏伊のように数十GeVの陽子加速器計画を打ち出そうと、イギリスの学者達は考えていた。しかしポンド危機は余りにも深く、新聞の伝える所によればイギリスの教育科学省は去る6月¹⁹20日「イギリスは西ヨーロッパ共同の300 GeV計画に参加しない」と発表したとのことである。それに対する西欧諸国の反応を知りたいのだが、筆者は未だ情報を入手していない。しかし、イギリスが降りたとして300 GeV総予算が $\frac{1}{2}$ 減るだけであるから、加速器建設には支障がなく、当初実験設備を一部節約乃至延期すれば何とかなるはずである。更にCERN発足に当ってのイギリスの態度を想起すれば、今後においてもイギリス政府の方針に変化が起ることもあり得よう。

イギリスは、152 cmの水素泡箱、1.4 mの重液体泡箱(ともに1965年完成)をもち、80 cmのヘリウム泡箱を最近完成させた。泡箱写真はCERNでとったものと、ニムロドでうつしたものを半々くらいの割合で解析している。エレクトロニクス実験では、イギリスは、

フランスに匹敵する陣容をもち活躍している。

西ヨーロッパの小国

スウェーデンのルンド大学が1.2 GeVの電子シンクロトロン(1963年完成)をもつのと、スイスがチューリッヒ郊外に500 MeVの大強度(50~100 μ A)の陽子加速器(小型の pion factory)を建設中であるほかには大きな装置をもつ国はない。

フランス、西ドイツ、イタリア、イギリスはCERNで活躍するばかりでなく、国内にも相当な高エネルギー施設をもち実験をしている。これらの国の国内での高エネルギー投資はCERNへの出資の2~3倍にも達している。そこでCERNへ出した研究者のみならず、CERNへ実験チームを送って研究するのも盛んに行なわれている。それに反して西欧の小国は国内に殆ど加速装置がないので、高エネルギーの electronics 実験チームをCERNにおくりだすことは、実際上非常にむずかしい。この方面でもスウェーデンとスイスが実験チームをつくりだしたのは両国の加速器事情に即応した先進体制といえる。それで西欧の小国の高エネルギー活動は、理論的なものと泡箱実験の解析作業に重点がおかれている。

西ヨーロッパ諸国の高エネルギー情勢は上に詳しく述べた通りである。日本の研究環境を西欧大国の水準に達せしめたいというのが我々高エネルギー研究者の希望である。我々は日本が、米ソ或は西欧連合の頂上計画と張り合っただけとは思っていない。日本の国力に応じた分を考えるべきだと信じている。上に記した西欧の大国の高エネルギー国家計画を読んで、読者はどんな印象をもたれたであろうか。彼等が大いに張切っていると読まれたならば、我々は更に—そう頑張らなければならぬ。彼等が彼等の国家計画実現において案外もたついているのではないかと—著者の意に反して—判断されたとすれば、それは日本の計画を遅らせてよいとの口実に使われては絶対に困る。もしも彼等が実際にもたつくようであれば、それは日本が先進国の高エネルギー(実験)研究水準に追いつく絶好の機会として活用すべきではないか。

筆者にはフランスの物理学者に親友・知人が多く、フランスの高エネルギー物理学のことを聞かされてきたので、それを以下に紹介したい。これは素粒子物理或は高エネルギー物理についていっているので、他の分野も同様であろうなどと拡大解釈されてはこまる。しかし我国の実状に鑑みて他山の石としたい。更にイスラエルについても若干のべておく。

フランス(追加)

(a) フランスの理論物理

Curie, Joliot の栄光を最後に、1930年代の中頃から、フランスの原子核及び

素粒子物理学は、地におちた。de Broglieは、電子の波動性を予言して、Poincareなき後のフランス理論物理学界に君臨した。以下フランスの理論物理学の中堅層の云い分依り、de Broglie批判を記しておこう。de Broglieはフランスの理論物理を実験からはなれた空虚な数学遊戯にみちびき、あたら有能な後輩を或は applied mathematician にするか、さもなければ彼等の理論物理のよい post への進出をはばんでしまった。この悪傾向への抵抗は（理論物理学者にあっては）Procaによってわづかに試みられたが、1950年代のはじめおしくも Procaは逝った。しかし Proca のまいた種はむだでなかった—Proca の弟子の中から d'Espagnat や（パリ生れで、ポーランドから留学生として戦後・冷戦直前にパリへきていた）Prentki（ポーランド人、今はフランス市民）はじめやがてフランスの理論物理を再建する連中が出たのである。フランスの理論物理の復興にイギリスとくは Peierls のはたした役目は大きい—Michel, d'Espagnat, Prentki 等フランスの中堅は、1950年の前後に、Manchester の Peierls のくんとうをうけているからである！（なお、CERN の Director General の Gregory もイギリスで教育をうけている。Ph. Meyer は^{ハーバート}アメリカ東部の大学を出た）。この de Broglie の例は、一つの限られた考え方で一国の理論物理学を支配することの愚をあまりにも無惨に示すものである。フランスはその理論物理にうけた痛手をいやすのに1950年代の終わりまでかゝっている。

(b) フランスの派閥

フランスは派閥の“すき”な国であった。de Gaulle 以前の政界の小党分立も、よくいえばフランス人の己人主義のよさ、悪くいえば大同団結をきらう国民性にねざすものとみられよう。それと同じことが物理学にもあらわれてもふしぎはない。それと同時にフランス人はパリがすきのようなのである。学会・大学はすべてパリにあって、学問上有名な地方大学をさがすのにむしろ苦勞するというべきだろう。従って派閥問題の舞台がパリであったのは当然である。

それは科学においても例外ではなかった。しかし最近になって少くとも高エネルギー物理に関する限り、広く協力して、フランスのそして西ヨーロッパの高エネルギー計画をすすめるのに大変熱心となった。誠によろこばしい事態である。

(c) フランスの高エネルギー実験施設

戦後のフランスの高エネルギー加速装置の建設は、当然といえばそれ迄のことだが、フランスの政治・経済情勢とくに戦争と強く関係している。

先づ、Mendes-France が Indo-China 停戦をした時の財政の余力で、Saturne (3 GeV, 1958年完成) をつくった。

その後もフランスの高エネルギー物理学に並々ならぬ意欲を示し、泡箱の開発と建造とか、Orsay の electron-linac (1 GeV, 1959年完成, 1968年に 2.3 GeV にする予定) の完成等を見た。亦 CERN への分担金は年間国民総所得 (3ヶ年の平均) に比例するものなのに、政治的配慮からイギリスと同額の支出 (国民所得比より高額) を~~回して~~^しきてきた。それが国民所得比まで減るのは ~~de Gaule 登場後~~⁷ 1957 年からである。(de Gaule はフランスの栄光を追うのに熱心で屢々算盤を度外視することがあるが、CERN 分担金には彼の冷静な理財家の面^をが如実に示~~された~~^し、イギリス ^{上げ} びみに ^も たり ^し び ^か った)。

また陽子の大型加速器 — 60 GeV の AGS — のプランもかなり長く提案されていた。しかし費用がかかるのと、提唱者が中堅核物理学者の広い支持を受けなかったため、遂に日の目を見なかった。

de Gaule が Algeria 戦争を終結させた後、再び高エネルギー物理への政府投資がふえた。そしてフランス政府は 1965年10月、235 MFF で 15 GeV の電子加速器をつくることに決定した。その後のことは前稿に書いたので繰返さない。

(d) フランスの原爆製造と核物理学者

フランス政府が原爆をつくることにきめて以来、フランスのまともな物理学者 (の大多数) はこの決定に反対であった。この事情は日本と誠によく似ている。radical な核物理学者たちの言をかりれば、フランス原爆の製造は、大学に原子力の聴講にきた軍の技術者と、高給でつられた物理学者の“落第生”の手に委ねられたという。サハラでフランス製原爆の初実験が行われる直前、友人たちが名をあげてあんな出来の悪かった連中が作っているのだから失敗しても不思議はないと云っていたが、幸か不幸か初実験は成功した。

(e) de Gaule 治下のフランス高エネルギー物理学を中心に

de Gaule が政界に復帰し、Algeria 戦争を解決した後、軍の不平をおさえるために、de Gaule は軍に高価な玩具を与えた。それは水爆とミサイルである。軍はこの最新玩具に気をとられ、それをマスターするのに手一杯で、不平をもらす余裕はなくなってしまった。de Gaule は亦政治・経済・文化においてフランスの栄光を輝かすのに熱意を燃やす。即ちフランス製人工衛星がとび、基礎科学への政府投資の増額、科学者の待遇改善、大学・研究所の近代化等に“目に見える” (口先だけでない) 成果をあげて来てい

る。1965年度のNobel生理学・医学賞がフランスにもたらされたのは、de Gaulleの並々ならぬバックに負うものであると、バリ雀は囀った。(！?) 高エネルギー物理については、偏極標的・大型泡箱の製作やフランス独自の加速器建設など実験関係においても最近頃に活況を呈している。

de Gaulleが、二大国家による世界支配を嫌い、西欧の“独立”を標榜することは余りにもよく知られている。そして彼にとって西欧の中心はフランスでなければならない。彼はこの“独立”政策を、政治・外交面のみならず、経済と文化・技術においても実現したいとする。上にのべた空間工業や高エネルギー物理等におけるフランスの目覚ましい現状は、de Gaulle（及び彼によって象徴されるフランス人氣質）のフランスの栄光への願望と科学者・技術者の要求とが合致した結果の産物といえよう。フランスは亦ロシアをはじめとして“東”の国々と文化交流を華々しく展開していることもくどくは云うまい（但し上述のフランス・ロシア関係の説明参照のこと）。

米英系資本から“独立”する、或は経済的に西欧を米・ソと並ぶ第三勢力たらしめんとする、de Gaulleの構想の基礎に、（日本では屢々見逃され勝ちであるが）基礎及び開発研究に於けるフランス若くは西欧のアメリカからの“独立”と云う重要な政策が据えられている。高エネルギー物理の振興もこの政策の一環をなすものである。フランスの学者・技術者は、フランス（文化）への強い執着から、イギリス、ドイツ、イタリア系のものに比べてアメリカに定着しにくい傾向があるようだが、de Gaulle政府の“自主独立路線”は永久的の海外流出をおさへ海外よりの帰国を促すのみならずフランス国内での科学者・技術者の養成を促進し、フランスをして基礎・開発研究や工業技術に於て西欧の中でも最も将来性に富むものにしつゝあると云ってよい。このような点からみると、例えばイギリスは第二次大戦中の痛手が小さかっただけにこれ等の面での脱皮におくれて目下苦悶中であり、西独は戦後の驚異的復興とそれに続く（一時的）繁栄に眩惑されて基礎及び開発研究を怠り学問と技術において第一次大戦後のような実力をもたないからである。

高エネルギー物理学にとって最も関係の深い計算機産業をとって見よう。かつて計算機産業は西欧でも、特にイギリスで幸先よいスタートをしたのだが、（今から云えば“中型”計算機、当時でいえば大型）計算機の失敗がたたって、up to dateな大型計算機の生産は西欧産業界から姿を消し、アメリカの計算機産業が西欧を支配してしまった。（尤も中型や小型のもの生産は細々と続けられて来たが）。フランスがde Gaulleの外交によってアメリカと冷い関係に入った後、フランスは最新の大型高速計算機をアメリカから輸入できなく（或は極めて困難に）なってしまった。何故ならこの種の計算機は主として軍事用として、priority No.1で以て、（直接、間接に）アメリカの“国費”で開発を

急がれているからである。CERNが大型の高速計算機(CDC 6600)をアメリカから輸入しようとした時、中々埒が開かず、終にCERNのDirector General (Weisskopf)がPresident Johnsonに直接交渉してアメリカからの輸出のOKをもらったというエピソードさえある。

フランスのこのような苦い経験とde Gaulleの国策とから、フランスは独自で(若くは西欧の数ヶ国の共同事業として)、アメリカと独立に、特色ある大型・高速計算機の生産を始めるべく真剣に準備をしている。例えば、そのためにSaclayへは大量の計算機開発費が与えられている。

フランスの学者、特に物理学者には、右よりは左の者が多く、元来Gaulistにはなりにくい。否むしろde Gaulleに反対のものが多いたと思われる。今でも(物理)学者の中でGaulistは少数派であるが、外交、技術、科学の問題に限って云えばde Gaulleの政策を支持する者がフランスの(物理)学者の中に圧倒的に多いように見受けられる。

(f) フランスの高エネルギー物理学の水準と将来性

国内にある陽子の大型加速器から見ると、フランスはアメリカはもとより、ロシア・イギリスに劣るけれども(しかしCERNを考えに入れると、米・ソとの比較・評価は変えずばなるまい)、フランスの高エネルギー物理学は世界の第一線に立つものといえる。フランス政府の基礎科学振興の熱意より見て、近い将来に(CERNやSuper-CERNの如き国際的な共同事業を除いて考へても)イギリスを抜いて西側諸国中アメリカに次ぐ高エネルギー実験施設をもつ国となるに違いない。フランスの高エネルギー物理学の将来は西欧諸国中最も明るいものと考へられる(先にのべた西欧各国の現状を比較されたし)。

イスラエル

イスラエルの低エネルギー核物理は理論・実験ともに世界一流のものであり、計算機も世界的な高水準を誇っている。素粒子物理は、日本のように、理論的活動が盛んであるが、高エネルギーの大型加速器をもっていない。しかし写真乾板による実験・泡箱写真の解析などの高エネルギー物理研究はきわめて盛んである。

以上は国内でのactivityについてであるが、国外のイスラエル系物理学者(イスラエル市民であると否とを問わず)の活躍については今更云うにあたるまい。イスラエルの物理学者の国際交流も亦極めて盛んである。イスラエル国内にいる実験物理学者は、或は外国の大学・研究所へ出かけて実験をしたり、或は国外で行った実験の解析とか泡箱写真の

解析などを国内で行っている。イスラエルは亦泡箱写真の自動解析等、データ処理の開発にも大いに努力している。

イスラエルには大加速器がないので、CERNへの加盟をのぞんだが、実現しなかった。しかし多くのイスラエル人が入れ変り立ち変りCERN等の高エネルギー研究所へ来て、“共同利用”しているので、形式的に加盟するよりも名を捨てて実を取っているとすべきかも知れない。

同国は、亦、将来の Super-CERN——そこには300 GevのAGSをおく——への加盟を強く希望しており、イスラエルの物理学者は学者間のレベルで非公式に加盟の打診をしている。イスラエルは地理的にアジアにあるし、対アラブ諸国の問題もからんでくるし、一国だけの加盟はまづいとふんで、アジアの他の国特に日本もイスラエルと共に Super-CERN加盟を申し込まないかとさそわれたりした(1966年)。

他方数年前から、時折イスラエルの物理学者達はCERNのアジア版をつくりたいと話をしており、日本と共にその音頭をとりたいと云っている。

またインド、パキスタンなどアジアの国々の物理学者も「素研」に深い興味を示し、加速器完成後は実験に参加したいと望んでいる。

13. CERNやSerpukhovをめぐる国際交流

高エネルギー研究において大学・研究関係の間の交流・共同作業はすこぶる盛であって、それは更に国境をこえ鉄のカーテンを乗り越えてめざましく進行している。その頂点をなすものが、Geneve(郊外)のCERNとDubnaのJoint Institute for Nuclear Researchであることはいりまでもない。

国境をこえての共同研究、特に実験装置をひっさげて外国の研究機関と協力する事は、今や日常茶飯事となっているが、その背後に国際交流を円滑ならしめるために費用分担、物品の国境通過にあたっての特別措置等につき関係政府間の合意があることを強調しておく必要がある。その具体例として(CERNそのものについては既に述べたから)、Serpukhov高エネルギー研究所での国際協力を特にとりあげてみたい。

ソ連のSerpukhovにできたシンクロトロン(ソ連ではシンクロファゾトロンと称している)は、元来1956~59年の当初計画では50 Gevのものとする予定であったが、その後BNLの陽子シンクロトロンに倣って変更を加え、70 Gevのものとして革命50周年(1967)の革命記念日を目標として完成を急がれて来た。そして去年10月13~14日の

夜、はじめて76 GeVの陽子線を出すことに成功した。この電磁石(直径500mの円周上に並ぶ)にはまだ余力を残しているので、エネルギーをもう少し上げることも可能な筈である。公称の強度はパルス当り 10^{12} 陽子(1分間に8パルス)である。

前回もこのべたように既に多くの実験が、この夏よりの実験開始を前に待機中であるが、加速器よりビームをとり出す装置とか泡箱などの準備がおくれているようである。欧米にとっては、この世界最大の加速器を利用することは、学問的に誠に意義ある事であり、更に研究者間の東西の一大交流は世界平和にとって少からざる貢献をするであろう。そういう訳で2~3年前からSerpukhovでの協同研究実施についてソ連と欧米との折衝が進められていた。

アメリカは、Serpukhovでの実験をするのに役立つ多くの装置を提供すると共にソ連との共同実験をしたいと申し入れたが、交渉成立には今までの所成功していない。

フランスはソ連との文化協定(1966)の柱の一つとしてSerpukhovでの協同研究をとりあげることになっている。フランスが建設中の大型水素泡箱(Mirabelle)はSerpukhovへ移され、その泡箱写真は仏ソ折半して研究される。

CERNは、Serpukhov研究所との協同研究を実現させる為に、1965年以来、ソ連側と非公式・公式(学者間及び対ソ連政府)の交渉を重ねた。ソ連側の希望とCERN側のofferの間にはかなりの差があつて妥結が危ぶまれていたが、急転直下CERN案をもとに合意に達し、1967年7月4日、モスクワにてソ連の原子力利用国家委員会の会長(Petrov)とCERN所長(Gregory)が正式協定に署名したのである。最初に実施するのは次の4項目で、その後の計画はこれから両者間の話し合で定められる。

- (1) CERNはその負担と責任で、はやいビーム取り出し装置を作り70 GeV加速器にすえつけ、完全に作動させてこれをSerpukhov研究所に贈与する。
- (2) CERNはその負担と責任で、(36 GeV/C迄のK中間子線を分離できるような)RF粒子分離器をつくり、Serpukhov研究所におく。それは少なくとも10年間そこで使用されるであろう。
- (3) 70 GeVシンクロトロンを利用して一年に1つのエレクトロニクス実験をソ連・CERN共同で行う。
- (4) 泡箱物理における協力。SerpukhovとCERNの間、若くは更に第三のグループを加えて、行われるはずである。

(1)により加速器から陽子線がとりだされて多くの実験に利用される。とりだした陽子線を外部標的にあて、得られた二次線は、(2)の装置を通して望みの粒子だけをえらびだし、特定実験就中大型泡箱に照射されるのである。(1)、(2)については、装置完成後はSerpukhov研究所が運転に当るが、それまでにソ連の専門家がCERN側と十分に協

力し1日も早く完成させたいとしている。(3)、(4)のような実験に当っては、泡箱写真フィルムを折半して解析するとか協同実験の連名による発表など、Serpukhov—CERN間の平等な立場を尊重している。(3)の共同実験は今年中に発足させるべく準備を急いでいる。またこれらの協力作業にあたって、人員・資料の交換、実験装置・部品の製作・輸送・補充等に関する事項やそれ等に要する費用・責任の分担法に至る迄大綱が規定されており、細部は両者間の会合でにつめられる。

今後の協力事業や(3)、(4)の実験の具体的な事項(テーマや参加者もふくめて)についてはソ連とCERNより同数の委員を出して構成される委員会で取扱われることになる。

「大西洋からウラルまで」のヨーロッパは政治に先んじて高エネルギー研究に於ては着々と実現しているといえるだろう。

Serpukhovでの共同研究に関するソ連—CERN間協定は「とり出し装置」と「RF粒子分離器」が完全に作働しはじめてから5年後迄有効とされ、一方が6ヶ月前に取消を申し入れない限りその後も自動的に1ヶ年づつ延長される。

CERNやBNLなどの高エネルギー研究所の研究活動全体から見れば、今日のSerpukhovでのソ連—CERN協力の当初内容は案外に小規模であった。またCERNの参加できる実験数に比し、CERN側の提供する技術と装置が多かったように見えるし、大加速器の建設費まで考えるとCERN側に有利なようにも思える。いづれにせよ今後の協力事業の進展を見た上でバランスシートに判断を下すべきものであろう。それに今度の協力事業を通じソ連と西欧の間に画期的な人的交流が行われることは、多少の損得を論外とする東西間の慶事である。CERNの経験と技術を最大限に生かして(1)、(2)の如き高エネルギー実験遂行に不可欠の装置ができるのは、高エネルギー実験に熟練した西欧の学者と共同で研究するのと並んで、初期においてはソ連にとって大きな利益をもたらすことであろう。

SerpukhovをめぐるCERN—ソ連の国際協力についてこんなに長く書いたのは、現在のトピックスであるし、また高エネルギーの国際協力を我々の問題として考える時の参考資料になると思われるからである。

14. 各国の高エネルギー研究支出

諸外国の高エネルギー研究の様子を一まわり見て来たのだが、ひるがえって日本の現状を見ると、余りの違いに絶句せんばかりである。成程高エネルギー物理の理論的研究にお

いては、我国は仁科、湯川、朝永等尊敬する諸先輩以来世界の学界にその存在を知られている。しかし実験施設に到っては西欧の小さな国々並みであって、CERNに当るものがないだけ我々は西欧の小国にすら劣ると云える。それを具体的に示すため、西欧諸国が1966年度に高エネルギー研究に投資した研究費を表6にかかげた。これによれば、日本と同程度の国民所得総額(表3及び表15参照)をもつフランス、イギリス、西ドイツ、イタリアでは、高エネルギーへの研究投資は年間50～140億円に達し、CERNへの分担金と同程度乃至は3～4倍の研究投資を国内研究にあてられていることが判る。それに対して西欧の小国は研究投資は1.5乃至10億円程度でしかも研究の大部分を直接にも間接的にもCERNに依存していることが判る。この表6は1966年度に関するものであるが、67年度以降は毎年8%程度の増加が予想される(CERNの予算計上に当って物価上昇によるスライドの率を、最近では、1年当り3.4%としている)。

既に強調しておいたように、CERNなる国際的研究センターを十分に活用できる為には加盟国の国内に十分な研究施設をそなえ旺盛な研究活動が存在しなければならない。逆にまた、加盟各国の研究により強力に支持されてこそ、国際的研究センターの研究水準がより一そう高められるの理である。これが西欧大国で高エネルギー研究のpolicyとして強力に打ち出されており、それが表6の研究費にも如実にあらわれて来るのである。この事情を日本の中での研究状況に適用して考えれば、現在の共同利用研究所、或は将来の「素研」、と各地の大学・研究機関との関係について極めて重要な教訓をひき出すことができる。即ち、この頃我国に新設される研究所は、いつでも共同(利用)研究所である。そのこと自体結構なことであるが、このような研究のセンターが第一線の研究をつとめていけるためには、(適当な数の)大学・大学院も先進国にひけをとらない研究・教育施設と研究費をもつことが絶対に必要なのである。

再び西欧のことにもどって、彼等が300 GeVシンクロトロンをそなえた新研究所の設立にふみきれば、8年半(シンクロトロン建設には約6ケ年かかる)にわたって18億スイスフラン(1967年の価格)(約1500億円)を投入しなければならない。その80%はシンクロトロン建設費で、残りが当初実験のための費用である。そうなれば、西欧諸国の高エネルギー研究の国際投資(CERN+300 GeV)は一挙に倍増されることになる。

このように諸外国の高エネルギーへの研究投資は実に目をみはるものがある。しかもそれは年と共にのびている。それを示すために、これまでのCERNの年間支出と戦後のアメリカの高エネルギー物理学への研究費支出とをそれぞれ表7、表8にかかげた。アメリカに関する表8から朝鮮及びVietnam戦争の影響をはっきりよみとれるであろう。さて、日本の高エネルギー支出は主として東大原子核研究所の高エネルギー部門(1.3 GeVの電子シンク

ロトロンをもち、それは全国研究者の共同利用に活躍している)及び素粒子研究所準備室に
来たものである(表6A)。我国の高エネルギー支出の規模が史上最高であった1966
年度でスペインに劣り、1967年度においてはノルウェーなみであった(捕鯨ならいざ知
らず、高エネルギー物理でこの有様とは!)。もう一度表6を熟視していただきたい。

戦後に於てはどこの国でも高エネルギー物理学への研究投資は全額政府の支出するところ
となっている。次に、政府支出の研究費の中で、巨大科学の一つと見做される高エネルギー
物理学はいかなる割合を占めているかを見ることにしよう。そのために表9~14を科学技
術要覧(昭和42年)より抜粋した。これらはいわゆる科学技術関係、Research and
Development(前者は基礎と応用にわけられる)、のための支出である。また現在におい
て主要国の政府予算に占める科学技術関係予算及び高エネルギー研究費の割合は表15に示
す如くである。我国の異常なる状況は余りにも明かであろう。

次にこれらの中で、Researchの占める割合を見るためにアメリカの政府支出を表16に
かかげた。アメリカについていえば、高エネルギー物理学は物理科学の項目の中で、天文・
化学・地球科学よりも研究投資が少く、固体物理(我国では物性物理とよびならわしている)
をわずか上まわる程度にすぎない。生物・医学や工学関係の政府支出に比べても妥当な比に
なっているといえよう。イギリスについての表17はScience Research Council所管
のものだけで、工学・医学等に対しては他の政府機関・民間団体からの多額の研究・開発投
資があることに注意してほしい。表18はフランスの物理学における分野別研究支出である。
イギリスやフランス等では、高エネルギー研究費は物理科学の研究費の中でアメリカに比べ
ると相対的に大きな部分を占めている。

科学は普遍妥当性を以て特色とし、国際性をゆたかにもっている。ことに高エネルギー実
験物理学の如き、所謂巨大科学の一つに数え上げられる分野においては、西欧諸国等では人
的にも財政的にも国際協力が必要となってくる。それにも拘らず、先進諸国が(国の威信を
かけてといわないまでも)高エネルギー施設の充実に努めているナショナリズム——それは
学者側にも政府側にも共通して存在する——をどうみたらよいであろうか。このナショナリ
ズムは学問の普遍性・国際性と矛盾しないであろうか。

それは、高エネルギー物理学が基礎科学の最も重要なものの一つで、それ自身更に深く追
及さるべきものだから、先進国は科学政策の重要事項の一つとして高エネルギー物理学をと
りあげているのである。次に高エネルギー実験物理学は最新の科学技術と密接にむすびつ
いており、大げさにいえば国の科学技術ひいては産業に大きな効用をもたらすものである。し
かしそれについては項を改めてやゝ詳しく述べることにしよう。とにかくそういった訳で、
各国政府も学者達も共に自国の科学と技術を進めることに熱心で、高エネルギーにおいても

頗るナショナリスティックなのである。国境や人種差別のない平和な世界をつくるのが我々の目標であるに違いないが、不幸にも国境は厳然として存在し、国家間・ブロック間のいろんな形の対立を緩和し解消するには時間と努力が必要である。そこでまず我々の国を国民を平和で豊かにすることも現代の重要な課題であろう。高エネルギー研究者は二つの道を同時に且熱心に進めている、ナショナリスティックなものと同インターナショナルなもの、我々は一日も早くこんな区別のない世界のくる日を望んでいる。そしてまた何度ものべたように国際的な或は世界的な研究センターは、各国の或は地域的な研究活動によって支えられはげまされるものである。そしてたとえ国境のない世界が実現したとしても、各地域の特色と伝統を生かすことが人類社会の進歩にとって必要なことであろう。従って各地域での研究活動をおろそかにしてはなるまい。

表 6

1966年度西ヨーロッパ諸国における高エネルギー物理学の研究予算

(ECFA Report 1967年の資料による)

(1スイスフラン
= 84円で換算した)

国名	高エネルギー物理学への総予算 (A)	国内で使用される予算 (B)	(B)のうちCERNでの研究と直接関係ある分 (C)	CERNへの分担金 (D)	$\frac{B}{D}$	$\frac{B-C}{C+D}$
	億円	億円	億円	億円		
フランス	144	115	29	29	4.1	1.5
イギリス	137	105	6	32	3.3	2.6
西ドイツ	90	56	10	34	1.7	1.0
イタリア	52	36	9	16	2.2	1.1
オランダ	9.3	3.7	2.8	5.6	0.7	0.11
スウェーデン	8.6	2.8	0.9	5.8	0.5	0.28
スイス	8.3	3.8	2.1	4.5	0.8	0.25
ベルギー	7.7	2.6	1.6	5.1	0.5	0.15
スペイン	6.4	1.4	0.8	5.0	0.3	0.10
デンマーク	3.7	0.8	0.5	2.9	0.3	0.09
オーストリー	3.4	0.6	0.2	2.8	0.3	0.13
ノールウェイ	2.9	0.8	0.3	2.1	0.4	0.21
ギリシャ	1.5	0.7	0.5	0.8	0.9	0.15
計	474.8	329.2	63.7	145.6	2.3	1.3
アメリカ	630					
日本	48					

▲ アメリカの資料は1965年度のものである。 ** 史上最高であった1967年度のもので、68年度は約3億円である。(表6A参照) は約61)

表 6 A

日本のエネルギー研究支出

expenditure for each fiscal year (in 10³ yens)
(excluding salaries)

(a) 東大原子核研究所の年間支出

fiscal year	素研準備室 EP	高エネルギー部 HE	宇宙線部 CR	核研の年間支出 総計*
1954 昭和 29				千円 30,000
1955 30		千円	千円	228,000
56 31		104,052	25,856	295,469
57 32		61,905	31,758	183,836
58 33		63,335	27,446	171,598
59 34		28,270	16,950	103,273
60 35		32,800	14,900	94,920
61 36		46,888	15,400	117,869
62 37		39,931	20,719	122,512
63 38		141,777	27,265	304,839
64 39	91,754	153,612	45,271	431,051
65 40	222,621	124,299	44,777	592,427
66 41	274,830	127,903	40,146	684,498
67	477,013	72,739	33,242	660,584
68				

* これは低エネルギー部・理論部などでの支出を含めた総計である。

(b) 科学研究費

1960	(宮本班)	50 万円
61	(")	61
62	(")	99
63	(熊谷班)	169
64	(")	169
65	(")	161.1
66	(北垣班)	
67	()	
68	()	

(c) 機関研究費

1961	東北大	750 万円
1962	"	600 万円
1963	核研	1000 万円

表 7

CERNの年間支出 (単位は100万スイスフラン)
即ち約0.84億円

年 度	CERNの年間支出	I S R 建 設 費	300 GeV 準備費	註
1952~54	7.0			} 年間支出
1955	19			
1956	39			
1957	60			
1958	57			
1959	56			
1960	66			
1961	70			
1962	81			
1963	95			
1964	111		3.8	
1965	133	3.9	2.9	
1966	152	21.1	4.0	
1967	175	71.5	4.4	
1968	198	78.4	4.1	予算額
1969	213.3	80.4		} 推定額
1970	228.5	72.3		

表 8

アメリカの高エネルギー物理学への支出

会 計 年 度	高エネルギー物理学への研究費支出(単位百万ドル)
1948	6.4
49	8.6
50	12.5
51	13.3
52	9.6
53	12.3
54	11.4
55	12.0
56	15.8
57	24 (その中, AEC 所管は 20)
58	32
59	51
60	56
61	87
62	108
63	129
64	146
65	158
66	175 (その中, AEC 支出は 97.4)
67	165 (" 107.7)
68	178 (" 113.4)
69	(" 120.4)

} (推定)

以下の3つの図 (Fig. 1~ Fig. 3) は、
 A Report of the High Energy Physics
 Advisory Panel of the Atomic Energy
 Commission (Aug. 28, 1967)
 よりとったものである。

HIGH ENERGY PHYSICS COSTS

Operating + Equipment

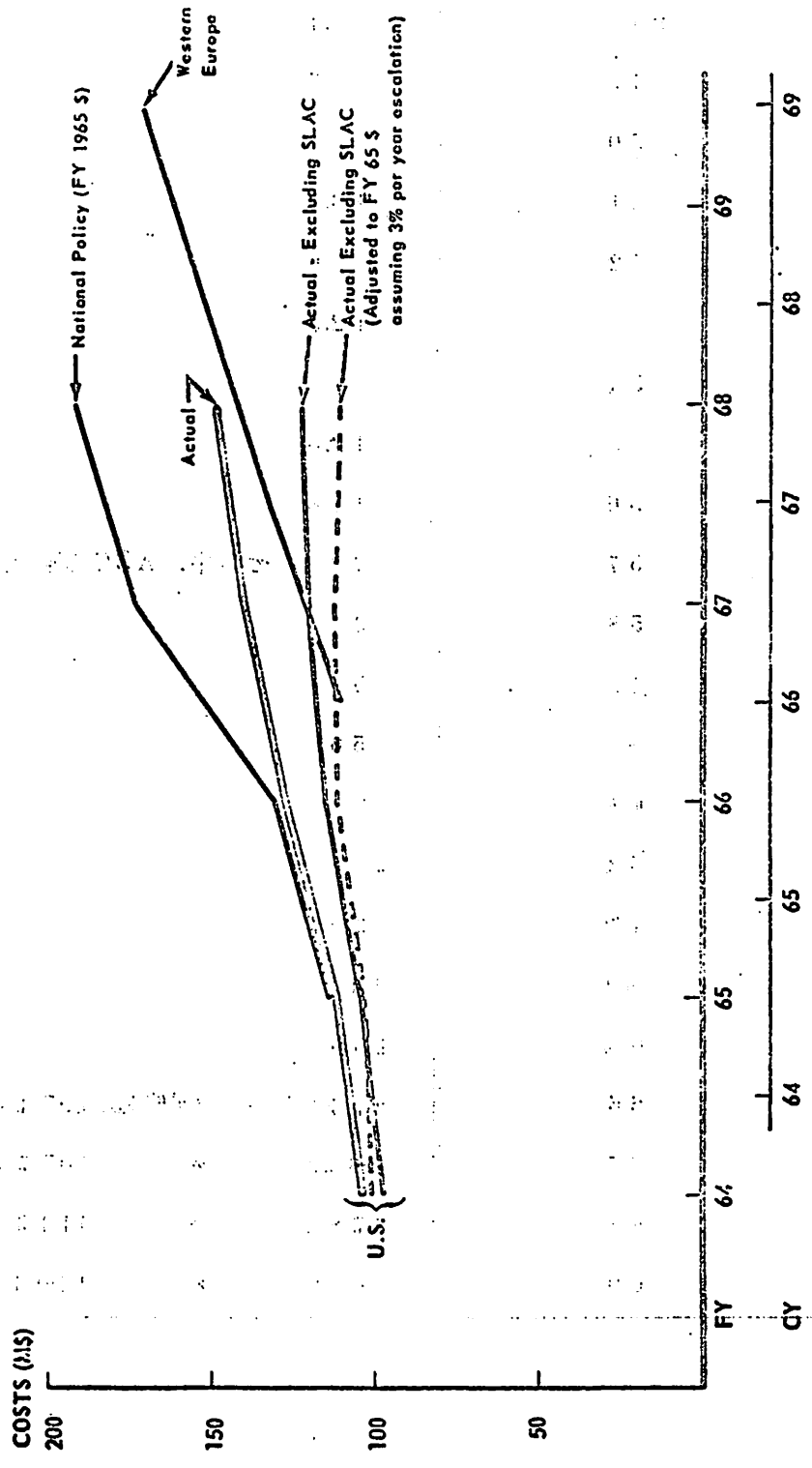


FIG. 1

HIGH ENERGY PHYSICS COSTS

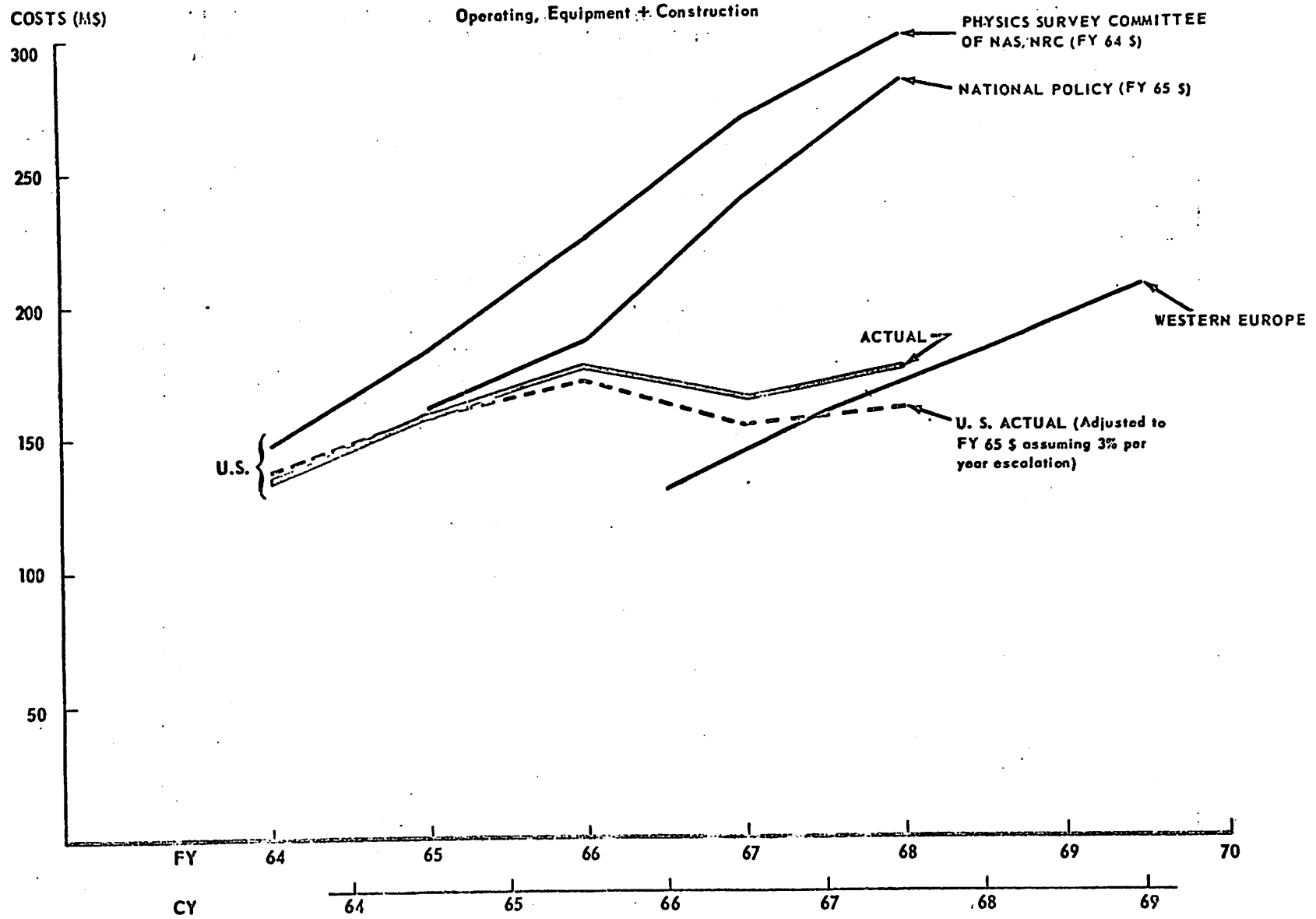
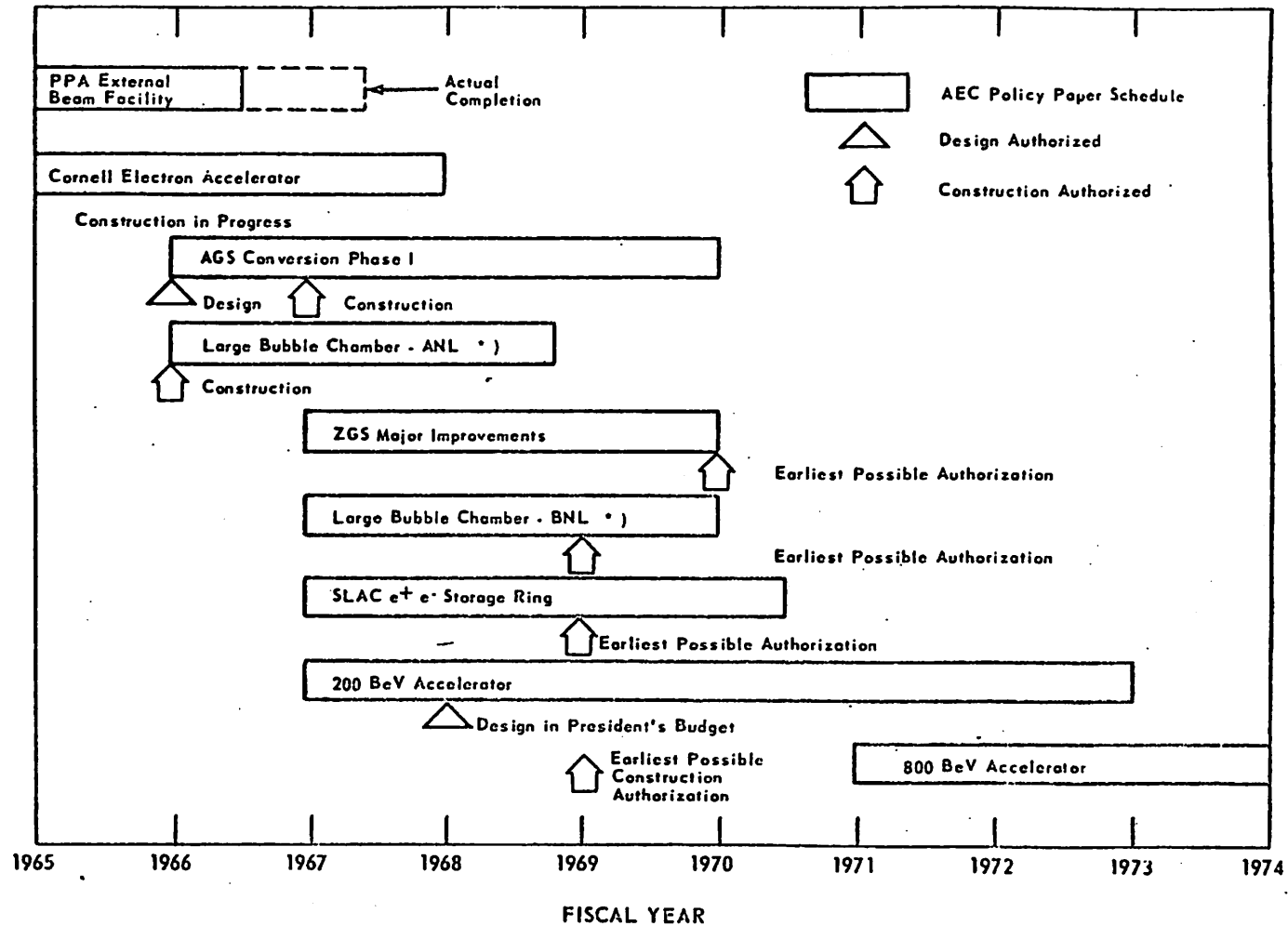


FIG. 2

MAJOR CONSTRUCTION ASSUMPTIONS
1965 AEC POLICY PAPER VS. AUTHORIZATIONS RECEIVED OR PLANNED



*) THE AEC POLICY PAPER INDICATED THAT 2 TO 3 LARGE BUBBLE CHAMBERS SHOULD BE STARTED WITHIN 1 TO 3 YEARS OF FY 1965 (Page 42, Item No. 8). THE LARGE CHAMBER REQUESTED BY BNL WAS TO FOLLOW THE FY 1966 AUTHORIZATION OF ANL'S CHAMBER.

FIG. 3

表 9 主要国の研究費と国民所得

年 度	日 本			ア メ リ カ			イ ン グ リ ス			フ ラ ン ス			ド イ ツ			ソ 連		
	A	B	A/B×100	A	B	A/B×100	A	B	A/B×100	A	B	A/B×100	A	B	A/B×100	A	B	A/B×100
	研究費	国民所得 (国民総 生産)	(%)	研究費		(%)	研究費		(%)	研究費		(%)	研究費		(%)	研究費		(%)
1955	億円 562	千億円 71.8 (87.9)	0.78 (0.63)	223	119 (144)	1.87 (1.55)	3,024	155 (193)	1.95 (1.57)		97 (124)			125 (180)				
56	735	79.9 (98.9)	0.92 (0.74)	301	127 (151)	2.38 (1.99)		169 (210)		108 (137)	1,793	139 (177)	1.29 (1.01)	69.2	420 ()	1.65		
57	999	91.3 (112.1)	1.09 (0.89)	353	133 (160)	2.70 (2.20)		179 (221)		119 (153)	2,191	151 (192)	1.45 (1.14)		448 ()			
58	1,141	94.2 (115.2)	1.21 (0.94)	390	133 (161)	2.97 (2.42)	4,816	187 (231)	2.58 (2.08)		138 (175)	2,579	162 (206)	1.60 (1.25)	96.8	504 ()	1.92	
59	1,489	107.5 (133.8)	1.38 (1.11)	448	145 (174)	3.13 (2.58)		197 (241)		1,632	148 (190)	3,081	175 (223)	1.77 (1.38)	112.6	544 ()	2.07	
60	1,844	130.1 (160.5)	1.42 (1.15)	491	150 (181)	3.31 (2.71)		210 (255)		2,072	165 (208)	2,776	207 (254)	1.34 (1.09)	131.7	588 ()	2.24	
61	2,452	154.1 (193.1)	1.59 (1.27)	518	155 (187)	3.41 (2.76)	6,391	225 (270)	2.87 (2.36)	2,506	178 (225)	4,364	226 (279)	1.92 (1.55)	152	628 ()	2.42	
62	2,812	172.2 (211.9)	1.63 (1.33)	*582	166 (200)	*3.47 (2.81)		234 (284)		3,347	198 (258)	5,242	245 (319)	2.13 (1.64)	*172	664 ()	*2.59	
63	3,211	199.8 (247.3)	1.61 (1.30)	*625	174 (218)	*3.65 (2.89)		249 (307)		4,556	217 (289)	6,162	259 (340)	2.38 (1.81)	*188	692 ()	*2.72	
64	3,818	235.8 (284.1)	1.69 (1.34)		187 (231)		7,550	287 (331)	2.87 (2.28)		237 (317)	7,076	284 (372)	2.99 (1.90)	*216	726 ()	*2.97	
65	4,258	250.7 (313.4)	1.70 (1.36)		203 (249)			284 (355)			253 (336)	*4,484	305 (404)	2.76 (2.10)	*236	770 ()	*3.06	

(注) 1 各国研究費の資料源は次の通りである。 日本：科学技術研究調査
アメリカ：Reviews of Data on Science Resources(National
Science Foundation) イギリス：Advisory Council of Scientific
Policy 年報。 ドイツ：科学研究者報告および年報。 フランス：科学技術研究部
務庁月報およびOECD資料(Science Policy in France)
ソ連：OECD資料(同前)

2 日本の研究費は1958年以前については時系列修正を行っている。
3 **ドイツの1960年の研究費は政府関係が9ヶ月子集であるため、前後と照合しない。
4 フランスの研究費は1963年から統計内容が変化しているため、それ以前の数値と厳密
には照合しない。
5 *印は不確定値
6 各国の国民所得(税関引当による)および国民総生産(市場価格による)は国連国民所得
統計年鑑1962および国連統計月報Nov '66による。(後出の表とは、資料平次が異
なるので、厳密には一致しない。)ただし、日本のみは国民所得統計(経済企画庁：昭和12

月20日)による。
7 年取区分は日本およびイギリスが4月に始まる年取、他は暦年である。

(a) アメリカー研究費の組織別負担額および使用額

(単位 百万ドル)

年次	合計	政府				産業界				大学				その他の非官利研究機関						
		負担額	使用額	財源政府	財源産業界	負担額	使用額	財源政府	財源産業界	負担額	使用額	財源政府	財源産業界	財源非官利研究機関	負担額	使用額	財源政府	財源産業界	財源非官利研究機関	
																				政府
1954	5,660	3,120	1,020	1,020	2,365	1,070	1,750	2,320	130	450	280	20	130	20	45	120	70	25	25	
1955	6,200	3,500	950	950	2,510	4,640	2,180	2,460	140	480	300	20	140	20	50	130	70	30	30	
1956	8,370	4,820	1,070	1,070	3,330	6,610	3,330	3,280	155	530	330	20	155	25	65	140	70	30	40	
1957	9,810	6,105	1,280	1,280	3,455	7,730	4,330	3,400	180	650	415	25	180	30	70	150	80	30	40	
1958	10,810	6,840	1,440	1,440	3,700	8,390	4,760	3,630	190	780	530	30	190	30	80	200	110	40	50	
1959	12,430	8,070	1,730	1,730	4,070	9,620	5,640	3,980	190	840	570	40	190	40	100	240	130	50	60	
1960	13,620	8,770	1,830	1,830	4,540	10,510	6,080	4,430	200	1,000	720	40	200	40	110	280	140	70	70	
1961	14,380	9,220	1,890	1,890	4,810	10,910	6,240	4,670	210	1,200	890	50	210	50	140	380	200	90	90	
1962	15,610	10,045	2,220	2,220	5,175	11,540	6,520	5,020	230	1,400	1,050	55	230	65	160	450	255	100	95	
1963	17,350	11,340	2,400	2,400	5,565	12,686	7,280	5,406	260	1,700	1,300	65	260	75	185	530	300	120	110	
1964					13,353	7,600	5,753													

(注) 1 Reviews of Data on R & D NSF 65-11, 64, May '65 に及び
Reviews of Data on Science Resources NSF 66-6, 67 Jan. '66 による。
2 年次は暦年である。

(b) アメリカー使用研究費の研究性格別分布

部 門	1960			1961			1962			1963			1964					
	実額統計	基礎	応用	実額統計	基礎	応用	実額統計	基礎	応用	実額統計	基礎	応用	実額統計	基礎	応用			
政府合計	1,900	10%	90%	2,090	11%	89%	2,222	9%	91%	2,404	11%	89%	2,888	13%	87%			
N A S A	179	27	73	263	26	74	213	12	88	381	22	24	54	18	28			
国防省	1,350	31	97	1,392	3	97	1,586	3	97	1,559	3	18	79	1,615	5			
農務省	104	27	73	116	29	71	109	29	71	118	31	62	7	130	33			
厚生教育省	97	26	74	119	26	74	121	25	75	132	29	69	2	150	30			
内務省	68	35	65	76	35	65	74	35	65	72	33	53	14	73	36			
海防省	29	38	62	35	37	63	32	47	53	39	48	31	21	54	38			
その他	73	25	75	87	25	75	87	25	74	103	24	41	35	111	24			
産業界合計	10,507	4	20%	76%	10,872	4	18%	78%	11,464	4	96%	12,686	4	19	77			
食品	102	7	50	42	105	8	92	117	6	94	127	12	51	37	135	9		
化学	986	12	42	46	1,073	11	37	52	1,190	11	89	1,279	11	89	1,284	13		
石油精製	290	18	40	41	294	16	42	42	305	16	84	313	16	44	40	337	16	
ゴム製品	120	3	97	126	7	20	73	135	8	92	150	6	17	77	150	7		
繊維	96	7	93	103	6	36	58	113	6	94	123	7	21	72	133	8		
一次金属	160	6	44	50	160	6	94	169	6	94	181	6	94	191	6	37		
金属加工	118	1	30	69	118	2	30	68	145	3	97	158	3	23	74	152	3	
機械	932	3	13	84	896	3	14	83	911	3	97	968	3	14	83	1,028	2	
電気機械	2,406	3	13	84	2,404	3	13	84	2,346	4	96	2,476	5	14	81	2,635	5	
自動車その他輸送機	864	1	99	802	1	99	802	1,011	2	98	1,104	3	97	1,189	3	97		
航空機及びミサイル	3,631	1	14	85	3,957	1	10	89	4,147	1	99	4,846	1	16	83	5,097	1	
理科学器械	396	3	24	74	384	3	22	75	439	3	97	483	3	16	81	483	23	
その他の製造業	236	*	*	270	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
製造業以外の業	160	10	27	68	180	*	*	*	334	*	*	389	37	63	42	10	29	
大学	1,200	375	48	52	1,400	695	49	51										
非官利研究機関	280	100	36	64	360	152	40	60										
総計	18,890	1,256	9	91	14,740	1,488	10	90										

(注) 1 1961年までの数値はNational Science Foundationの年報による。
2 1962年以降の数値はFederal Funds for Research, Development and other Activities Vol. XII-XIV及びReviews of Data on Science Resources Vol. I, II, Dec. '64 (NSF-64-26)及び67 Jan. '66 (NSF-66-6)による。

3 基礎研究とは、特定の工業的目をもたず、単に科学的知識の進歩のために行い研究である。
応用研究とは、製品・工程への応用という特定の目的をもって新しい科学的知識の探求のために行い研究である。
開発とは、科学的発見や知見を製品・工程に移すための技術的活動である。
4 *印は分類不明。

表10

(C) アメリカのAEC所管の研究費

(単位 100万ドル)

項目	会計年度	1967 (実額)	1968 (推定)	1969 (推定)
高エネルギー物理学		107.7	113.4	120.4
中間エネルギー "		11.0	11.1	11.6
低エネルギー "		27.8	28.8	30.1
数学及び電算機の研究		5.8	5.7	5.9
化学		52.7	54.0	56.3
冶金・材料の研究		26.1	27.1	28.3
制御された 熱核融合研究		22.4	24.9	27.4
計		253.4	265.	280.

(d) 表10(C)の高エネルギー物理学の内訳

(単位 100万ドル)

	1967 (実額)	1968 (推定)	1969 (推定)
プリンストン・ペンシルバニア加速器	7.90	7.95	8.15
CEA	8.45	8.05	8.20
AGS (BNL)	18.43	19.75	20.38
コスモトロン (BNL)	1.44	0	0
ZGS (ANL)	16.43	16.75	17.28
ペバトロン (カルフォルニア大学)	15.35	14.75	14.75
SLAC (スタンフォード大学)	15.27	21.10	24.05
その他の研究及び開発	24.43	25.05	27.60

表 11

(a) イギリス—組織別負担研究費

部 門	1955～56		58～59		61～62		64～65	
	実 額	構成比	実 額	構成比	実 額	構成比	実 額	構成比
防 衛	百万ポンド 177.5	% 59.1	百万ポンド 234.3	% 49.0	百万ポンド 245.7	% 38.7	百万ポンド 255.1	% 33.7
政 府	32.7	10.9	64.2	13.4	110.1	17.4	128.2	16.9
民 事	12.0	4.0	17.6	3.7	29.2	4.6	43.7	5.8
部 門 研究会類								
小 計	222.2	74.0	316.1	66.1	385.0	60.7	427.0	56.4
大 学	0.5	0.2	1.5	0.3	1.3	0.2	1.8	0.2
公 社	5.8	1.9	11.5	2.4	22.7	3.6		
私 企 業	68.3	22.8	136.0	28.5	213.0	33.6	327.8	43.3
そ の 他	3.2	1.1	12.7	2.7	12.0	1.9		
総 計	300.0	100.0	477.8	100.0	634.0	100.0	756.6	100.0

(注) Advisory Council on Scientific Policyの年報による。

(b) イギリス—組織別使用研究費

部 門	1955～56		58～59		61～62		64～65	
	実 額	構成比	実 額	構成比	実 額	構成比	実 額	構成比
防 衛	百万ポンド 65.7	% 21.9	百万ポンド 102.7	% 21.6	百万ポンド 93.2	% 14.7	百万ポンド 91.5	% 12.1
政 府	10.5	3.5	39.4	8.2	61.9	9.8	72.7	9.6
民 事	10.0	3.3	13.1	2.7	23.0	3.6	28.1	3.7
部 門 研究会類								
小 計	86.2	28.7	155.2	32.5	178.1	28.1	192.3	25.4
大 学	14.4	4.8	23.3	4.8	32.4	5.1	55.9	7.4
研 究 組 合	4.9	1.6	6.4	1.3	8.1	1.3		
公 社	5.8	1.9	10.6	2.2	21.4	3.4	508.4	69.2
私 企 業	185.0	61.7	266.3	55.8	367.7	58.0		
そ の 他	3.7	1.2	16.0	3.4	26.3	4.1		
総 計	300.0	100.0	477.8	100.0	634.0	100.0	756.6	100.0

(注) Advisory Council on Scientific Policyの年報による。

(c) イギリス—研究費の研究性格別分布

部 門	1961～62			
	実 額 総 計	基 礎	応 用	開 発
政 府 部 門	百万ポンド 178.1	% 13	% 34	% 53
大 学	32.4	85	15	0
研 究 組 合	8.1	23	77	0
公 社	21.4	2	41	57
私 企 業	367.7	3	20	77
合 計	607.7	11	25	64
そ の 他 の 機 関	2613	-	-	-
総 計	634.0	-	-	-

(注) Advisory Council on Scientific Policyの年報による。

-44-

32

(a) フランス—組織別負担研究費

(単位 百万フラン)

財 源	1959	1960	1961	1962	1963
民間部門計	492	680	760	1,175	2,073
政府部門計	1,746	2,161	2,676	4,041	*4,586
リサーチ・パッケージ	248	402	543	579	690
宇宙	-	-	16	86	110
原子力	328	328	381	1,037	1,274
軍事	686	1,130	1,477	1,519	1,453
パッケージ外	284	301	339	784	981
教育	150	135	157	377	
その他	134	166	182	407	
公社・地方公共団体					78
総 計	2,238	2,841	3,436	5,216	6,659

(注) 1 1961年以前の数値はOECD資料(Science Policy in France)による。
 2 62年以降の数値はフランス科学技術研究総務庁月報(第62,91)による。統計の内容に変化があるので、61年以前とは厳密には接続しない。
 3 *海外および国際機関への支出を含むため。(c)表の数値より大きい。

(b) フランス—組織別使用研究費

(単位 百万フラン)

研究実施部門	1959	1960	1961	1962	1963
民間部門計	1,145	1,470	1,750	2,375	3,103
政府部門計	1,085	1,374	2,183	2,841	2,268
科学研究本部	166	248	247		
原子力・軍事・航空等	622	755	1,451		
産業技術センター	65	100	110		
電力・ガス・運輸	70	80	90		
その他	142	191	285		
大 学 計					844
非官利研究機関計					34
総 計	2,230	2,844	3,933	5,216	*6,248

(注) 1 フランス科学技術研究総務庁の資料による。
 2 61年以前と62年以後とで統計の内容に変化があり、厳密には接続しない。
 3 *海外および国際機関での研究費が除かれているため。(d)表の数値より小さい。

(c) フランス—研究費の組織間の流れ(1963年)

(単位 百万フラン)

財 源	実施機関				総 計
	政府	大 学	民間企業	非官利研究機関	
政 府	2,162.2	836.8	1,059	16.2	*4,074.2
民間企業	23.6	5.4	2,044	-	2,073
非官利研究機関	0.7	-	-	18	18.7
海 外	81	1.9	-	-	82.9
総 計	2,267.5	844.1	3,103	34.2	6,248.8

(注) 1 フランス科学技術研究総務庁月報(第91)による。
 2 *海外および国際機関への支出を除いてあるので、(a)表の数値より小さい。

(d) フランス—使用研究費の研究性格別分布(1963年)

(単位 百万フラン)

財 源	研究性格			計
	基 礎	応 用	開 発	
政 府	218 (9)	992 (44)	1,058 (47)	2,268(100)
大 学	727 (86)	17 (14)	0 (0)	844(100)
民間企業	20 (1)	1,260 (41)	1,823 (58)	3,103(100)
非官利研究機関		34 (100)	0 (0)	34(100)
総 計	* 965 (15)	* 2,269 (39)	2,901 (46)	6,248(100)

(注) 1 フランス科学技術研究総務庁月報(第91)による。
 2 民間企業の基礎・応用の区分は推定値である。
 3 *非官利研究機関を除く。

表 13

(a) ドイツ—組織別負担研究費

(単位 百万マルク)

年度	連邦政府 (基本費)	州政府	民間	その他	合計
1956	171	940	836	45	1,992
57	337 (9)	1,043	991	63	2,434
58	542 (21)	1,161	1,106	56	2,865
59	646 (24)	1,300	1,413	64	3,423
61	1,066 (36)	1,770	1,940	73	4,849
62	1,400 (29)	2,108	2,229	87	5,824
63	1,616 (34)	2,639	2,500	92	6,847
64	2,052 (33)	2,911	2,800	99	7,862
65	2,191 (31)	3,480	3,650	106	9,427

- (注) 1 1964年までの数字はドイツ科学研究者第1回報告書(1964)による。
 2 其中長年滞在日本大使館からの報告レミニドイツ科学研究者1965年報から算出した。
 3 1965年の数字は在日日本大使館からの報告による推定値である。
 4 その他は市町村およびERF特別資金である。

表 14

ソ連—科学研究費と政府予算

(単位 10億ルーブル)

	総予算額 A	科学研究費			B/A × 100
		国庫 C	国庫予算によるもの B	企業等の資金によるもの	
1959	70.4	2.8	2.0	0.8	2.8%
60	73.1	3.3	2.3	1.0	3.1
61	76.3	3.8	2.7	1.1	3.6
62	82.2	4.3	3.0	1.3	3.7
63	87.0	4.7	3.5	1.2	4.0
64	92.2	5.4	4.0	1.4	4.3
65	99.5	5.9			
66	105.3	6.5			

- (注) 1 在ソ日本大使館の報告による。
 2 1959~64年総予算はソ連国民経済統計年報1962, 1964による。1965年予算は1965年ソ連統計年報による。
 3 科学研究費総額は各年度大臣財政演説による。
 4 科学研究費中企業予算分はソ連国民経済統計年報1962, 1964による。

(b) ドイツ—連邦政府科学研究予算の内訳

(単位 百万マルク)

年度	1962	63	64	65
一般科学研究費	374.1	378.9	426.0	500.9
原子力研究開発	312.0	335.4	422.3	442.6
宇宙研究	11.0	50.5	141.0	137.9
国防研究	409.1	546.2	646.8	683.2
学生奨励	99.8	92.0	102.8	115.0
行政関連研究	193.7	213.1	225.8	261.5
計	1399.7	1,616.1	1,964.7	2,191.1
年間増減率		15.4%	21.6%	11.5%
連邦予算に対する割合	2.7%	2.9%	3.3%	3.5%
研究費の内訳	844.5 (60.4)%	927.2 (57.4)%	1,079.4 (52.6)%	
研究・実験	455.3 (32.5)	596.9 (36.9)	881.2 (42.9)	
教育	99.8 (7.1)	91.6 (5.7)	91.5 (4.5)	

- (注) 1 ドイツ科学研究者1965年報による。
 2 国内及び出稼期間の関連行政費を除く。
 3 研究生奨励の数字はドイツ科学研究者第1回報告(1965)による。

表15 主要国の政府予算に占める科学技術関係予算の割合

国 別	会計年度	予 算 総 額 (a)	科 学 技 術 関 係 予 算 (b)	b/a	資 料 等	高エネルギー物理 への支出(1966年)	国民総所得 (1965年)	
アメリカ	1966/67	112,847百万ドル 40兆6,249億円	16,152百万ドル 5兆8,147億円	14.3%	NSF年報(1967 年版)による。	630億円	203.兆円	アメリカ
ソ 連	1966	1,054億ルーブル 42兆1,600億円	65億ルーブル 2兆6,000億円	6.2	aは大蔵省資料, bは在ソ大使館 報告による。	—	77.	ソ 連
フランス	1966	100,994百万フラン 7兆3,700億円	9,261百万フラン 6,753億円	9.2	aは大蔵省資料, bは在仏大使館 報告による。	144	25.3	フランス
イギリス	1967/68	8,388百万ポンド 8兆4,551億円	518百万ポンド 5,224億円	6.1	在英大使館報告 による。	137	28.4	イギリス
ド イ ツ	1967	77,014百万マルク 6兆9,313億円	3,167百万マルク 2,851億円	4.3	在独大使館報告 による。	90	30.5	西ドイツ
日 本	1967	4兆9,509億円	1,679億円	3.4		6*	25.1	日 本
						52	16.4	イタリア

* 史上最高

注) 比較に際しては、各国の予算制度の相違、資料の制約等に留意する必要がある。
とくに、ドイツについては、州政府予算は含まれていない。
科学技術庁編科学技術白書(昭和42年版)による。

表 16 *

(a) アメリカにおける諸科学に対する連邦政府の研究支出(1963-1965会計年度政府支出分)

NSF資料より

区 分	総 額 (億円)			基 礎 研 究 (億円)			応 用 研 究 (億円)		
	1963	1964	1965	1963	1964	1965	1963	1964	1965
全 分 野	14,645	16,440	18,338	4,885	5,880	6,748	9,760	10,560	11,590
生 科 学	3,372	3,900	4,285	1,360	1,560	1,745	2,012	2,340	2,540
心 理 科 学	260	347	412	130	178	214	130	169	198
物 理 科 学	10,370	11,502	12,740	3,300	4,030	4,660	7,070	7,472	8,080
物理	(4,878)	(5,562)	(6,050)	(2,783)	(3,390)	(3,950)	(2,095)	(2,172)	(2,100)
数学	(317)	(363)	(410)	(147)	(178)	(200)	(170)	(185)	(210)
工学	(5,175)	(5,577)	(6,280)	(370)	(462)	(510)	(4,805)	(5,115)	(5,770)
社 会 科 学	288	370	454	90	106	122	198	264	332
そ の 他 科 学	355	321	447	5	6	7	350	315	440

* 1ドル = 360円で換算した。

(b) アメリカにおける諸科学に対する研究支出(1965会計年度 政府支出分)

NSF資料より

区 分	総 額 (億円)	基礎研究 (億円)	応用研究 (億円)
全分野	18,338	6,748	11,590
生科学	4,285	1,745	2,540
生物科学	893	598	295
医 学	3,080	1,040	2,040
農 学	312	107	205
心理科学	412	214	198
物理科学	12,740	4,660	8,080
物 理 学	(6,050)	(3,950)	(2,100)
天文	860	810	50
化学	773	348	425
地球科学			
気 象	828	442	386
海 洋	197	117	80
地 球	1,245	977	268
物理			
高エネルギー	633	618	15
原子核	222	131	91
原子分子	607	252	355
固体物理			
その他	579	185	394
その他物理	106	70	36
数学	(410)	(200)	(210)
工学	(6,280)	(510)	(5,770)
航 空	1,140	50	1,090
宇 宙	1,535	47	1,488
化 学	525	50	475
都 市	125	10	115
電 気	980	70	910
機 械	419	47	372
金属・材料	650	200	450
その他工学	906	36	870
社会科学	454	122	332
人類学	27	25	2
経済学	158	50	108
社会学	66	19	47
その他社会科学	203	28	175
その他科学	447	7	440

表 17

イギリスにおける1966年度の各研究分野の研究費*
(人件費を除く)

分 野	研 究 費 (億円)
天 文 学	17.0
高 エ ネ ル ギ ー 物 理	131.0
原 子 核 物 理	15.0
物 性 物 理 及 び そ の 他 物 理	23.8
数 学 ・ 計 算 機 科 学	17.0
化 学	23.8
生 物 学	13.6
工 学	20.4
宇 宙 及 び 電 波 科 学	68.0
そ の 他	10.4
計	340 億円

* Science Research Council の資料による

表 18

フランスにおける物理学全般の政府予算(1966-1970の5ヶ年間)*

1) 設備費的な予算の分野別区分

天体物理・プラズマ物理	86 億円
高エネルギー(素粒子)物理・原子核物理	650
原子物理・光学	58
固体物理・エレクトロニクス	260
力学・音響学・熱力学	108
理論物理・生物物理・海洋物理	120
そ の 他	158
計	1,440 億円

総額の中4/5に相当する1,150億円は国内で、残り1/5に相当する290億円はCERN等国际機関への出資である。

2) 運営費的な予算(消耗品費, 運転費, 人件費等)

5年間で

2,880 億円

3) 総 計

4,320 "

* (Physics Today, Nov. 1967 p. 612 による)

1) 2) の

現代及び近い将来の基礎科学にとって、物質の窮極構造を明らかにしようとする高エネルギー物理学は、生命の本質を追及する現代の生物科学と並んで最も重要なものである。これらの基本的な科学は、華々しく展開する space science と technology にかくされることなく、それ所か宇宙の神秘がときあがされ新発見のある毎に新たな刺激を得て進んでゆくことであろう。周知の如く、核物理学は星のエネルギー発生機構、星の進化、元素の起源を解明するのに決定的な寄与をした。中性微子が超高温の星の進化に重要な役目をする事が明らかとなったが、高エネルギー物理の新しい知識が要求される天体现象が今後ますますふえていくであろう。宇宙科学との関聯をぬきにしても、物質の構造は我々の最も知りたい基本的な謎の一つであり、今後とも人類の好奇心と研究心をそよりたてるものであるにちがいない。

高エネルギー物理の科学としての意義はいい尽せないが、基礎科学としての価値だけから先進諸国が前にのべたような巨額の高エネルギー研究費を支出しているとい切るのはむづかしい。学問本来の立場からいえば、その価値より判断すべきだとの議論もあり得ようが、不幸にして我々は金勘定の世界に生きている。高エネルギー物理学が先進諸国に於て多額の研究費にめぐまれているのは、それに伴う技術が国の技術開発の重要な面に大いに効用があることに由る。そこで思いつくまゝに効用をひろいあげてみよう。——効用をくわしくのべるからとて、効用を以て学問自身の意義にすりかえる魂胆はさらさらない。

まず高エネルギー実験に必要なものとして、加速器、加速された粒子線のとりだし装置、粒子分離器、測定器、データ処理方式、高速大型電算機をあげることができる。いずれも先進技術の粋を集めたものであり、常時技術開発を加えてゆかねばならない。技術開発は、広く発掘され貪欲に吸収されるばかりでなく、高エネルギー研究所において物理学の範囲を超えて理学・工学の多くのすぐれた専門家によって盛んに行われている。それらの質と量（とくに近年のそれ等の上昇率）は驚くべきものがある。そしてそれ等は他の分野に有効な利用面を見出して行く……

CERNでは陽子シンクロトロン（性能の精度は0.1%以下）100個を半径10.0 mの円周上に、地盤変動の影響をうけないようにして、0.1 mmの精度で据えつけた。これは土木・建設事業上画期的な作業であって、ダム建設などに有効な応用をみたと聞く。BNLのシンクロトロンは砂の層の上に“浮かし”であるが、CERNのものは地下の岩盤に達する支持棒の上になっている。シンクロトロン（の支持法）を決定するにあたって地盤変動の精密測定が行われ、大西洋上より近づく高気圧がヨーロッパ大陸を押し下げることがGeneveで観測され、地質・気象学者の注目をひいた。

加速器に陽子ビームを入れる線型加速器，加速器の加速部分，粒子分離器につかうRF系は，戦中・戦後のレーダーの発展に負う所が大であった。最近ではSLACの2 mile machine (20 GeVの電子線型加速器)で使う為にスタンフォード大学と会社が強力且耐久力あるクライストロンの開発，量産を競い，かろうじて加速器の完成に間に合わせるなど，高エネルギー側からのこの方面への技術開発がふえている。

超低温における超電導は，物性物理学上の研究にとまらず，電力輸送，電話，電算機などの運転の安定化とコストダウンからも注目をひいている。高エネルギー実験にとっても超低温施設は欠かせぬものである。まず第一に液体水素は陽子標的として素粒子反応の電子トロニクス実験に必要なものであり，又泡箱にも大量に使用される。次に高エネルギー実験において粒子の運動量は益々高くなり，それを測るのに更に強力な磁場が要求されるので，従来の技術的方法では限界に達してしまった。そこで超電導を用いた強力磁場が高エネルギー研究に大いに利用されるにいたった。更にそれは冷凍器を購入しても電気代が格安となって全体でコストダウンできることによる。BNLの80インチの水素泡箱(27°Kの液体水素をつめる，有効体積は850ℓ，1963年6月完成した)は280トンの鉄と30トンの銅線よりなる電磁石にかこまれ4MWの電力で20.4キロガウスの磁場がかけられる(泡箱と磁石の合計450トン)。高エネルギー物理の要求からいえば，もっと強い磁場が必要なので，泡箱用の大型超電導磁石が高エネルギー研究所で開発され，すでにアルゴンヌ研究所，BNLなどでは12呎，7呎の大型超電導磁石が製作されている。ビーム輸送用磁石やbending magnetも次第に超電導のものに変わろうとする気配があり，将来の陽子用colliding beam machine (例えば200~300 GeV 加速器に附属させるといふデスク・プランがある)の磁石は多分超電導のものとなる。

超低温技術(とRF技術)は陽子のスピンの向きをそろえた偏極標的を用意するのに必要である。偏極標的の実現は高エネルギーと物性物理の研究者の協力によって生まれたものであって，その高エネルギー物理への寄与は実に大きい。(ついでにいうが，レーザー光線はSLACの2 mile machineを直線にalignするのに使われている位だが，放電箱の効果的使用や偏極した光子・電子線発生用に応用されそうである。)

線型加速器でのRF cavityの壁での電力損失を軽減するのに超電導を用いる試みがスタンフォードやカールスルーエ等ですゝんでいる。特にスタンフォードではその基礎研究がすみ次第，同大学の1.2 GeVの電子線型加速器を超電導方式に改造し2.5 GeVのものとする計画をたてゝいる。

こゝに列記した極低温利用の技術開発は高エネルギー側が一方的な受益者であるような印象を与えたかも知れないが，事実は決してそうではない。高エネルギー側の強力な要求の下

に高エネルギー研究者が低温関係の専門家と協同して開発をすすめているのである。又この記載は長きに失したと見られるかも知れないが、将来の高エネルギー研究所では大部分の機器を(極)低温中に保たれるとの予想が高いのである。もしそうなったら、他の分野へのフィードバックはいかばかりであろうか。

部屋大の泡箱製作に当って光学的に均一で途方もなく広く厚いガラスの製作とか、エレクトロニクス実験に要求される速く安定な回路、ISRに必要な超高真空(その容積が桁ちがいに大きい)等あげるべき話題は果てしが無いが、最後に電算機についてふれておこう。高エネルギーになると共に生起する現象の種類は益々多くなり、その中から必要なものをえらび出すについても、又特定の反応をくわしく調べるに当っても、測定し処理すべきデータ及び情報量はおどろく程多数である。そこで(エレクトロニクス)実験では小型計算機を測定装置に直結させて、データの予備的処理と集積を行い、後で大型計算機に最終的な解析を行なわせるのである。また大型泡箱は年間数百万枚の立体写真をとる。これらの膨大なデータの処理は電算機に過重な要求を課すものであって、その著しい例として宇宙科学や軍事研究でテスト済みとされた大容量高速電算機(CDC 6600)が1965年にCERNで重大な困難に出会ったことをあげることができる。CERNとコントロール・データ社CDCは1年にこえる苦難の整備を余儀なくされたが、その結果CDCは大容量高速度のものについて、長く電算機市場に君臨したIBMをおさえて、独走するに至った。そしてBNLその他高エネルギー研究所がこのCDCのものをCentral Computer及びデータ処理用として採用しつつある。

近頃しばしば加速器のレンタルシステムをとれとか、或はCERNに加盟したら安上りであろうとかいわれる。しかし前にのべた様に十分な国内研究施設なしに“共同利用”に参加することは、単に学者、技術者及び外貨の海外流出をもたらすばかりとなる。日本の研究レベルを高め、技術の向上に益する所は甚だ少なく、日本の頭脳と費用で外国の為のサービスに努める結果となる。決して安上りでなくつまらないことである。

念の為に現在日本がCERNに加盟する案を吟味しよう。現在のCERNはヨーロッパのためのもので、現にイスラエルは加盟を希望したが地理的理由(アジアにある)で実現しなかった。300 GeV 発足となれば西ヨーロッパの経済的負担を軽減するため、他の国々の加盟をむしろ歓迎する可能性は大きい。但し現行の規約によれば、新研究所とCERNの両方に加盟することが要求される。表3や表6からみて、その場合の日本の年間分担金は少なくとも70~80億円であろう。更におくればCERNに加盟するときにはそれまでの投資総額と比べて応分の新規加盟料をとるという扎扎实りした規約もある。加盟国は分担金に比例して所員(科学者・技術者のみならず、事務職員やサービス要員まで)をおくる権利があるのだが、日本とヨーロッパの距離、言葉の点を考えてこの権利は充分に

行使出来るだろうか。繰返し述べたように外国の研究機関に参加するにしてもまづ国内に高エネルギー研究投資をすることが、学問のためにも、技術開発のため、更に又外国にある高エネルギー研究施設を十分に使いこなすためにも、絶対に必要である。

要するに加速器の建設を含めて高エネルギー実験の諸技術は航空機・ロケット・造船・車輛などの産業のように国の総合的な工業力に依るもので、バランスのとれた先進技術の基盤なしに高エネルギー実験を進めることは不可能である。その意味で加速器は先進国の技術水準を現わす指標の一つといえよう。奇蹟的な高速度生長をみせる日本が、高エネルギー物理学のために大きな研究投資をしないですむ理由は見当らない。外国に対してももはや“日本は貧乏だから云々”というのは通用しない。国家百年の爲にも研究のためにも抜本的な投資を考ふる時期にきている筈である。

我国が西歐の大国なみの国力をもつ現在、そして科学と技術だけが我国の最重要な“資源”である以上、我国でフランスや西ドイツ位の高エネルギー研究活動ができて然るべきである。

Colliding Beam Machines について

colliding beam machine 乃至は storage ring について，世界各国にあるものの一覧表を示し，その物理的意義を簡単に論ずる。

§ 1 世界の現状

先づ，世界の colliding beam machines を一覧表にしておこう。

表 I colliding beam machines の一覧表

フランス		粒子の種類	E	[Remarks]
Orsay	$e^+ - e^-$.400 Mev	(single ring)	1965 年末完成 通称 ACO
<u>西ドイツ</u>				
Hamburg	$e^\pm - e^-$	several Gev		計画中
<u>イタリア</u>				
Frascati	$e^+ - e^-$	350 Mev	(single ring)	1964 年完成 通称 AdA
Frascati	$e^+ - e^-$	1.5 Gev		1966 年末完成予定 通称 Adone
<u>スイス</u>				
CERN	p-p	28 Gev		65 1966 年完成 建設開始 1971 年完成予定 略称 ISR
(Geneve)				
do.	$e^- - e^-$	2 Mev		{ 1966 年完成 ISR のモデル実験用 CESAR と略称される [1964 年の状況]
<u>ロシア</u>				
Kharkov	(Ukrainan Division of Academy of Science)			
	$e^\pm - e^-$	100 Mev	(double ring)	テスト中
Novosibirsk	(Siberian Division of Academy of Science)			

	$e^+ - e^-$	130 Mev	(double ring)	予備運転中	VEP 1
	$e^+ - e^-$	700 Mev	(single ring)	250 Mev 迄達した。	VEPP2
	$e^+ - e^-$	3.5 Gev		建設中(1968完成予定)	VEPP3
	$p - p$	12 Gev		(1971完成予定)	VEPP4
Moscow (Lebedev Institute)					
	$e^- - e^-$	170 Mev		storage の研究中	
Moscow	$e^+ - e^-$	270 Mev		FIAN と称す, 詳細は?	
アメリカ					
MURA	e^- storage	45 Mev			[Remarks] storage and extraction experiments
(Stoughton)					
Princeton - Stanford					
[mark III]	$e^- - e^-$	300 ~ 550 Mev	(double ring)	1961年完成 1965年2月完成	e^+e^- 散乱 実験に成功
Stanford					
[SLAC]	$e^+ - e^-$	3 ~ 4 Gev			design study
Cambridge					
[CEA]	$e^+ - e^-$	3 ~ 4 Gev			design study

この表で、例へば“ $e^+ - e^-$ 400 Mev”と書いてあるのは400 Mevの e^- に400 Mevの e^- をぶっつける colliding beam machine であることを示す。

colliding beam machine なるアイデアはMURAのグループの発案にかかるもので、実用のもので建設が直ちにPrinceton-Stanfordの共同 project として取上げられた。しかしこれは上の表で判る通り $e^- - e^-$ の double ring である。

イタリアも早速この colliding beam machine の案にとびついた。そして一昔前、イタリアの高エネルギーの national program として、陽子の大型加速器をとらずに、 $e^+ - e^-$ の colliding beam machine を建設することにきめた。これは費用の節約と物理的意義のバランスから決定したことであると思われる。 $e^- - e^-$ に限定せず、 $e^+ - e^-$ とした事は後で説明するように器機の有用性を飛躍的に増大するものである。

そこで、イタリアはまづ小さな器機 AdA を作った。¹⁾ これによって colliding beam machine の技術開発を行い経験を十分積んだ上で、本番である Adone の建造へとむかう計画であった。AdA は Princeton-Stanford よりおくれで発足したにも拘らず、後者より一足

先に完成し、Bremsstrahlung

$$e^- + e^+ \rightarrow e^- + e^+ + \gamma \quad (1)$$

の観測（世界初演は1964年4月、Orsayにて）によって、それが予期したように beam-beam の衝突実験に使へることを実証した。²⁾しかしそれまでにいくつもの思いがけない困難を克服しなければならなかったが、ついに実験(1)をなしとげると共に、Adoneへの道を切り開いたのであった。

AdAはFrascatiでつくられまたテストされているが、Frascatiには1.1 GeVの電子synchrotronしかなく必要な e^\pm 源としては不足であった。それでAdAはやがてOrsayへ移され（1962年）、その1.3 GeVの e^- -linacを利用する、イタリア、フランスの共同作業となった（1962~1965）。実験(1)もOrsayで行われたのである。（尙AdAは1965年3月Frascatiにもどされた）。

Adoneは今年（1966）末完成を目標に建設作業が進んでいる。そしてAdoneの e^\pm 用の e^- -linacも新たに建設されつつある。

先に述べたように、イタリアは高エネルギーの国家事業としてAdoneを考えたのであったが、その後の高エネルギー物理の進歩——特に実験装置の巨大・精密化——と経済の繁栄から、再び陽子の大型加速器の必要を痛感するに至った。目下のペーパークラッシュでは50 GeV辺の陽子のAGSをつくることを望んでいる。（このイタリアの事情については又後でふれる：§5をみよ。）

§2 colliding beam machineの有効性

高エネルギー E_L の粒子（質量 m ）を stationary target（簡単の為に質量を m とする）にあてる時CM系での total energy \sqrt{s} は

$$s = 2m(E_L + m) \quad (2)$$

で与えられる。それに対し colliding beam machine で質量 m 、energy E の粒子線を正面衝突させると、CM系はLab系と同じものであって、CMでの total energy \sqrt{s} は

$$\sqrt{s} = 2E \quad (3)$$

となる。(2),(3)より energy E の colliding beam machine は、energy が

$$E_L = (2E^2/m) - m \quad (4)$$

の加速器で得られた粒子線を stationary target にあてるのと同様である。

例をあげよう。400Mevの $e^- - e^-$ の colliding beam は 626Gev の electron accelerator で作った e^- beam を electron target (at rest) にあてるのと同じ実験になる。また 30Gev の $p - p$ colliding beam machine は、実に 2TeV をこえる proton accelerator と同じ $p - p$ collisions を実現する。

これが colliding beam machine の偉力である。

しかし colliding beam machine は万能というわけではない。ふつうの加速器ならば、それをつくった粒子線を target にあてて collision experiments をできるばかりでなく、target から高エネルギーの二次線 (e^- からは γ 線, p machine では中間子や baryon, antibaryon 等) や三次線 (μ や ν) をつくって、有用で多様な実験ができる。それに反し, colliding beam machine では colliding experiments ができる丈で、その時生じた二次線・三次線の利用に関しては、同じエネルギー $E_L (=E)$ の加速器——それは colliding beam machine に beam を供給するためにどうしても必要(尤も colliding beam machine の storage ring 内で加速ができるとしても)——に比べて強度から云ってまるで問題にならない。例外は colliding beam でのみエネルギー的に生成可能な新粒子(又は共鳴状態)の性質の研究であろう。

こういう意味で colliding beam machine はむしろ単能な実験装置と看做すべきものである。

§ 3 $e^\pm - e^-$ colliding beam machine の物理

$e^- - e^-$ colliding beam machine の主目的は QED のテストである。実際 Princeton-Stanford の colliding beam machine で 300Mev $e^- - e^-$ の弾性散乱の実験が 1964 年行われ、 10^{-14} cm まで QED がなりたつことが証明された。³⁾

$e^+ - e^-$ の器械は、QED 用にも勿論使えるが、その他に annihilation によって多様な反応を起し得る。二体系への one photon annihilation だけを考えると

$$e^+ + e^- \rightarrow \begin{cases} \mu^+ + \mu^- \\ \pi^+ + \pi^- \\ K^+ + K^- \\ p + \bar{p} \\ \text{その他} \end{cases} \quad (5)$$

の如く豊富である。



の如く non-strange mesons (又は excited states) の研究にも有用であるし、



等は hadrons の電磁構造因子 electromagnetic form factors の $q^2 < 0$ の領域を調べるのに有効である。それに対し、



は $q^2 > 0$ での form factors を見る実験である。〔(9)は poleology の如き間接法をとらない限り実験資料が得られないが、(7)は直接に実験できる！〕これ等の二、三の例だけからでも、 $e^+ - e^-$ machine の有用性が判明しよう。 $e^+ - e^-$ は $e^- - e^-$ に比べて、実に比較にならない程多くのことに役立つ。electron の colliding beam machine を作る時には、 e^- のみならず e^+ beam の source を用意すると共に e^\pm 両用に使えるように留意すべきである。

このように $e^\pm - e^-$ machine は有意義なものとはいえ、素粒子物理の最も重要な課題である hadrons とそれらの強相互作用を調べるのにはあまり適したものではない。それにはどうしても $p - p$ の colliding beam machine がある。それについて次節に述べよう。

§ 4 $p - p$ colliding beam machine

前節の最後に述べたように、 $p - p$ colliding beam machine は超高 energy での強作用を研究するのがその使命である。それは超高エネルギーでの $p - p$ collision experiments

専用のもので、§ 2で注意したようにやはり単能な実験装置である。

CERNでは、2Mevの $e^- - e^-$ colliding beam machine (略称CESAR (CERN Electron Storage and Accumulation Ring))を作ってmodel 実験と技術開発を重ね、他の研究所のcolliding-beam machineの経験を取り入れて、1966年より1971年までかかって、 332×10^6 スイス・フランを投じて、28Gev pに28Gev pをぶっつける器械をつくることになっている。これはIntersecting Storage Ring, ISR と称される。⁴⁾二つの陽子線は8ヶ所の直線部で約 15° の角度でほとんど正面衝突をする。このp-p collisionはLab energy 1700Gevの陽子とhydrogen target (proton at rest)との衝突と同等である。

ISRの主要パラメタは次表に示した通りである：

Table II : Main Parameters of the ISR

Number of rings	2
Circumference of rings	942.66m
Number of intersections	8
Intersection angle at crossing points	$1.4 \cdot 7885^\circ$
Maximum energy of each beam	28 Gev
<u>MAGNET (one ring)</u>	
Maximum field at equilibrium orbit	1.2 T
Maximum current to magnet coils	3750 A
Maximum power dissipation	7.04 MW
Number of magnet periods	48
Number of superperiods	4
Total weight of steel	5000 ton
Total weight of copper	560 ton
<u>R.F. SYSTEM (one ring)</u>	
Number of r.f. cavities	6
Harmonic number	30
Centre frequency of r.f.	9.53 MHz
Maximum peak r.f. voltage per turn	20 kV
<u>VACUUM SYSTEM</u>	
Vacuum chamber material	(low carbon stainless steel)
Vacuum chamber inside dimensions	$160 \times 52 \text{ mm}^2$
Design pressure outside intersection	

regions

Design pressure inside intersection 10^{-9} torr

regions 10^{-10} to 10^{-11} torr

CERN - PS の現在の強度は普通

1×10^{12} protons/pulse, 1 pulse/2.5 sec

である。1970年迄に 10^8 スイス・フランを投入して遂行される PS の増強計画が完了すれば PS の強度は現在の値の数十倍になり、約5分間で、ISRに20Aのビームをためることができるようになる筈である。storeされたbeamが長もちし、beam-beam collisionが beam-residual gasのcollisionよりずっと多くなるためには、ringの中、とくに collision sectionを超高真空 (10^{-11} torrの実現を目標とする) に保つことが必要される。その他にもISRは新しい技術開発を数多く要し、加速器工学的に頗る興味深い事業である。

ISRの実現した際には、宇宙線物理学は更に超高エネルギーの稀な現象の方へ追い上げられることになろう。

ISRによって何が出来るかについては、大加速器及び宇宙線による高エネルギー物理の研究から或程度推察できる。しかし今までこれ等の領域で、エネルギーの不足及び頻度僅少の為見出されなかった現象や・新粒子・の発見に、ISRが予期せざる新知見をもたらすものと期待したい。今迄エネルギーが画期的に増大した時、常に、素粒子現象における驚異的新知見が豊かに発見され素粒子物理学がより魅力的なものになって来たからである。

ISRに要する 332×10^8 スイスフランは大金である。ISRでなしに陽子加速器AGSを作るとすれば、強度をそう欲張らないなら100Gevのものできよう。

ISRでは“一つの実験”しかできないのに、 ~ 100 GevのAGSなら種々な実験ができる！300億円の費用を投入するのに、ISRがよいか、又はAGSがよいかの選択には、物理学上のみならず政治的経済的判断も含めて、速かで高度の決断を要求される。当時CERNのDirectorであったWeisskopfはISR建設の断を下し、それに応じて去年(1965年)末西欧12ヶ国の政府はISRを共同で建造・実験することを承認した。

この決定に至る経過の表向きのことは、色々な資料に出ている。ここでは裏面の事情に一寸ふれておこう。

CERNやBNLのAGSは、計画の時間表通りに完成し、しかも予定通りのenergy及び強度のbeamを出したのであった。energyは磁石できまってしまうので、大ていの加速器では計画したと同じenergyが出るものであるが、計画通りの強度が完成後直ぐ出たのは、これ等二つのAGSが加速器史上最初のものである。これはAGSの優秀さを如実に物語るものであ

る。更にその後の改良によって、CERN及びBNLのAGSの強度の増加は誠に目ざましいものがある。その結果1964にBNL、次で同年CERNでは現存AGSの大改造計画案を発表し、強度を現在のものの数十倍(以上)に上げる方法を提唱した。この計画はやがて実行に移され、幾分の改良(と予算節約)を伴いながら作業が進んでいる。新実験室・新実験設備(超大型泡箱を含む)費を含めたAGS改造費はBNLで約 200×10^6 スイス・フラン、CERNで約 100×10^6 スイスフランとされている。両者共1970年(頃)計画完了の予定である。(ちなみに、このようなAGSの利点が我国の高エネルギー計画を40Gev AGSに変換した理由でもあった。)

CERN-PSは器械としてはBNL-AGSをやや上廻る性能を誇っているが、物理の成果においてはCERNはBNLにおされ勝ちである。CERNでは加速器屋は大いに自信をもっていて、ISRという野心的事業をすすめたがっているが、物理屋は大型AGS(又は、例えば、ISRの一方のringを加速器兼用にして~60Gevの陽子線も作れるようにしたいというISRの改良案)の方に傾く者が少なかった。この両者の関係は、どこかの国の加速器仲間のようになり、余り円滑でなく、又両者間の討論は時期を失したきらいがあると同時に、討論そのものも物理学的・技術的であるよりは、政治的決定とか過去のゆきがかかりにとらわれすぎていた——以上は僕の主観的、断片的な情報にもとづくものである。

そう云う色々ないきさつがあり、更にISRと300Gevの大加速器との優先順位——ここでも物理屋は多く後者を先にしたが、加速器屋は技術的により面白い前者を優先させたがった——という難物をかかえて、Weisskopfは(加速器屋中心にきめた案に従って)ISRを先に作るという決断を下したのだった——げにも、高エネルギー研究所長たるものの責任は重大であるといわねばならない。

300億円という予算は、先進国においても、政府の政治的決定を必要とするものである。又数百億円(以上)の計画になると、同程度に意義のある複数の大規模な計画を同時にすすめることは、必ずしも国家(又は国家群——CERNのような国際機関の場合)の許す所とはならないであろう。いくつかの計画の中から一つのものを選択することは、その後何年かにわたっての素粒子物理学の発展に重大な影響を及ぼすものである。この事情は我国の陽子大加速器をもつ素粒子研究所の計画についても完全にあてはまる事柄である。

CERNではISRにふみきったが、アメリカではベトナム戦の影響(予算の圧縮)もあって、p-p用のISRは作らないことにきめた。その代りBerkeleyの欲する200Gev protonのAGSを、California大学のものとせず、全国共同利用のものとして出来るだけ早くつくことにきめられた。そして広くアメリカ全国から適当な敷地を選定しようとしている。(今ではWestonにきまった——1968年追記)。

§ 5 終りに

colliding beam machine は一つの面—— 超高エネルギー —— で、かけがえのない装置である。装置自身の技術上の諸問題のほか、それによって生ずる衝突現象をどのように detect するかについてはまだ十分に解明されていない。自明なことは全立体角をおおう detector があることだが、space の limitation, “前方”を見にくい等の点も含めて、どういふ detection scheme を開発してゆくかは今後に残された大きい問題である。むしろ、適当な detector を発案したものが、名をなすことになると思うべきであろう。

それにしても colliding beam machine は単能の器械でそれを使い実験物理学者の数は極めて限られたものである。イタリアには電子加速器——それも限られたテーマの事しかできないし、比較的少数の実験しかまかなえない——しかなかったし、AdA と Adone に吸収される実験屋の数も知れたものである。Frascati に 1.1 GeV の electron synchrotron ができた時、実験家の数は step-wise に (若干の——今からみればほんの一寸した) 急増をみたが、その後 CERN-PS (ヤアメリカ流出) に多くの実験家が吸われ、イタリア国内での実験家の数の不足、実験施設の不備、若い実験研究者養成の絶対的な劣勢及び CERN を含めて国外で活躍している研究者はイタリアへ帰りたいたとしても帰る場所がない等、事態の根本的改善が急務であることを痛感させた。その結果、今やイタリアでも proton の national machine (50 GeV 前後のもの) をつくろうという運動がはじめられるに至った訳である。

表 I (§ 1) に示したように、Hamburg, Cambridge, Stanford といった電子の大加速器をもつ研究所では 3~4 GeV の e^+e^- colliding beam を作ろうと計画をはじめている。

又ロシアは新型加速器の案出・開発に並々ならぬ関心を持ち、colliding beam machine についても大いに意欲をもやしている。動きはじめた colliding beam machines の総数だけを見れば、ロシアは世界に於ける最優位を誇っている。

我国は、高エネルギー実験装置においては先進国中のもっとも立ち遅れていて、colliding beam machine⁵⁾ については茶飲み話以上の事は何にもない。

(1966-11-11)

本稿は 1966 年 11 月 9 日、基礎物理学研究所で開かれた「lepton の高エネルギー現象の研究会」の席上話したことをもとに、若干の手を加えたものである。

1) AdA の description

C. Bernardini, G.F. Corazza, G. Ghigo, and B. Touschek, Nuovo Cim. 18, 1293 (1960),

C. Bernardini, U. Bizzarri, G.F. Corazza, G. Ghigo, R. Querzoli and B. Touschek, Nuovo Cim. 23, 202, (1962)

stored beams の lifetime や size について :

C. Bernardini, G.F. Corazza, G. di Giugno, G. Ghigo, J. Haissinski, P. Marin, R. Querzoli and B. Touschek, Phys. Rev. Letters. 10 407, (1963).

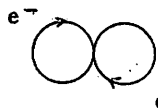
- 2) C. Bernardini, G.F. Corazza : G. di Giugno : J. Haissinski, P. Marin : R. Querzoli ; B. Touschek, Nuovo Cim. 34, (1964) 1473-1493

この実験では beam の強度は 0.5 milliamperes (e^- 及び e^+) 迄であって, beam の lifetime は several hours であつた。intense beam の lifetime に対する基本的な制約が AdA のグループによって発見分析され, 今では Touschek 効果と呼ばれている [分献 1] の最後の論文を見よ)。

- 3) 1965 年 2 月 1 日に実験の成功が announce された。

300 MeV e^- と 300 MeV e^- が独立な二つの rings に store され, 中央の直線部で e^- - e^- 散乱を行わせた (真空度は 1.0^{-8} torr)。

300 MeV e^- を 300 MeV e^- にあてるのは 360 GeV e^- を e^- at rest にあてるのと同等である。



この実験成功迄に Princeton-Stanford group は 6 ケ年働いている。

Stanford にあるこの storage rings は, "Mark III" linear accelerator から e^- をためるもので, 35 時間 e^- をためたことがある。夫々の ring での beam current は約 0.03 amperes であつた。この実験グループは CM 系の total energy 1.1 GeV の e^\pm - e^- collision を実現すべく extension を行っている。

装置について

G.K.O' Neill, Proceedings of the International Conference on High-Energy Accelerators and Instrumentation Geneva, 1959, edited by L. Kowarski, p.125

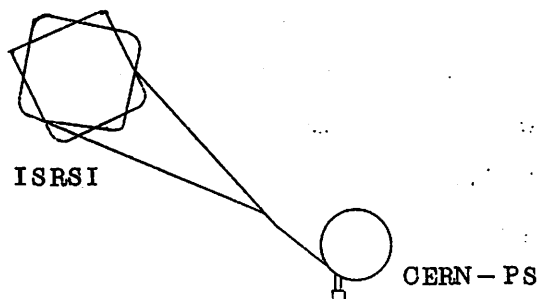
e^- - e^- 弾性散乱の実験

W.C. Barber ; B. Gittelman, G.K.O' Neill, and B. Richter, Proceedings of the Fifth International Conference on High-Energy Accelerators, Frascati, Italy, 1965, (to be published) 及び Phys. Rev. Letters, 16 (1966) 1127~1130.

4) ISR at CERN

- ☆ two concentric distorted rings, each about 300m in diameter.
- ☆ two beams intersecting each other in 8 places.
- ☆ protons (28Gev) ejected from the CERN-PS.

更に詳しくは表IIをみよ。



ISRのスケッチ
(トポロジカル)

CERNのISRは e^- の加速器をつければ, 4.5Gev e^- beam同士の colliding beam machineとしても使えるし, 又 e^-p 用にも利用できる。

ISRについては例えばCERN Courier, vol 6, no. 7, July 1966 が素人向きである。

- 5) colliding beam machinesについては最近の加速器・測定器の国際会議の Proceedings 等に review がのっている。 $e^\pm - e^-$ collision phenomena の物理的意義の review としては例へば, R. Gatto, Proceedings of the International Symposium on Electron and Photon Interactions at High Energy, Hamburg, June 8-12, 1965, vol. I, p. 106 を見よ, 又 Orsay で September 26~30, 1966 に International Symposium on Electron and Positron Storage Rings が開かれた。その Proceedings がいずれ出るものと思う。

追記 (1966-12-05)

1966年9月26~30日の間 Saclay で, International Symposium on electron and positron storage rings が開かれた。ここでは研究発表と共に, 既存又は建設中の machines の status reports も発表された。ここで新しく話題になったことを二つ, CERN Courier, vol. 6, no. 11 より抜き書きしておく:

The first has been developed at the Cambridge Electron Accelerator. Scientists there hoped to construct storage rings for their electron synchrotron but the proposal was not supported since electron rings at Stanford can potentially achieve much higher intensities. Attention then moved to the possibility of using the

existing machine to accelerate a positron beam in the opposite direction to the usual electron beam, thus dispensing with the expensive storage ring. A positron injector has been requested for the Laboratory in the 1967 budget.

A pulse of positrons would be injected into the synchrotron ring and accelerated to an energy of a few GeV. At this energy, the synchrotron radiation from the beam damps the random motions of the positrons. The small beam would be decelerated to injection energy and another pulse of positrons fed in, this pumping procedure continuing until 100 mA of positrons were stored. An electron beam of equivalent intensity would then be injected and the two beams simultaneously accelerated, in opposite directions.

The intensities would still be low for colliding beam work and the second aspect of the proposal involves the construction of a "bypass" — a loop alongside the synchrotron ring into which the full energy beams could be deflected. In the bypass, very high vacuum could be maintained (to increase the probability of looking at electron-positron collisions and not collisions with gas molecules) and also, by a special arrangement of magnets, the beams could be focused to very small cross-section in the intersecting region. This would overcome the intensity limitation of the larger cross-section beams in the synchrotron.

The idea will probably be incorporated in the Stanford proposal and the possible advantages of using a similar system for the ISR at CERN have been considered. It appears, however, that only small gains would be possible and at considerable increase in the cost and size of the project.

The second new development, from Novosibirsk, concerns the use of "electron cooling" to increase the density of proton or antiproton beams in storage rings. The size of a beam is determined by the spread in energy of the particles it contains and by the spread in the radial and vertical oscillations of the particles. Any technique which reduces these "spreads" can result in a more dense beam.

The "electron cooling" idea is to use a parallel beam of electrons, with uniform

velocity equal to that of the ideal average proton, to take the "heat" out of the proton (or antiproton) beam, where "heat" is considered as the random motion about the average proton energy. The carefully prepared electron beam would be fed into the proton beam, for example, along the length of a straight section in the storage ring. The "hot" protons would tend to give up some of their energy to the electrons each time they passed through the electron beam. Over a very large number of turns, the random motion of the protons would be slowly reduced.

The use of electron cooling is a vital part of the "VEPPONE" project (see Table). It is now being studied at ISR, to see if it could be employed in any future move to proton-anti-proton physics.

meson factories について

meson factories について若干の解説をする。オリジナルな点は全くなく, "sector-focused cyclotrons (及び meson factories) に関する国際会議" ¹⁾ と "高エネルギー加速器と装置に関する国際会議" ²⁾ との proceeding を rapid scan して書いた印象記である。いくらかは review たらんと心がけたが, 器機の詳細の如き筆者の手に余ることは思い切って省略した。現存の加速器と比べて将来の meson factories がどのような位置を占め, 如何なる物理学的研究をなし得るかを示すよう心がけたつもりである。しかし時間切れで, とり急ぎ書いたことをおことわりしておかねばならぬ。

I 準備

meson factories の意味する状況 — 加速器学的及び原子核・素粒子物理学的な — をうきぼりにするために, 若干の序論的記述をしておく。

§ 1.1 beam intensity とその単位

singly charged particle の beam の flux については

$$1 \text{ ampere} \equiv 1 \text{ a} = 0.6242 \times 10^{19} \text{ particles/sec} \quad (1.1)$$

の関係がある。

meson factory でよく出てくる目標として

$$100 \text{ ma の } 1 \text{ Gev proton beam} \quad (1.2)$$

をとると beam power は 100Mw (Mw = mega watts) に達する。因みに人間が 1 日に 2000 kcal を放熱するとしてさへ, 平均の power は

$$2000 \text{ kcal/day} \sim 0.1 \text{ kw}$$

にすぎないし, 敦賀原子力発電所 (1968 年完成予定) の電気出力が 30 万 kw (= 300Mw) であることを思えば, meson factories のねらう beam (1.2) の偉力の見当がつくであろう。

表 1.1

	accelerator	energy	intensity	beam power
p	SOC-ORNL (design の目標)	800Mev p	100ma (average)	80Mw
p	CERN-PS	25Gev p	10^{12} p/pulse/2.3sec (1966 年春)	1.7 kw
e	e-linac design (SLAC) 1966 末	20Gev e 18Gev e	30 μ a (average) ~10 μ a (")	600kw 200kw

比較のために，既存の accelerators の典型的なエネルギー・強度を表1，2にまとめておいた。核研のデータ：

核研の FF cyclotron の proton beam intensity

energy 8~12Mev p
 internal beam ~500 μ a
 external beam ~100 μ a ($\Delta E/E \sim 0.5\%$)
 ~ 10 μ a ($\Delta E/E \sim 0.1\%$)

after analyzer

(旧測定室での値)

核研の FM cyclotron 55Mev p (700cps)

internal beam ~ 2 μ a
 external beam ~ 0.5 μ a ($\Delta E/E \sim 0.2\%$)
 duty cycle 2.1%

と比べることは興味のあることであろう。

表1,2 常識的な available beam intensity

accelerator	energy	internal beam (average)	external beam (average)
cyclotron ^{a)}	$\lesssim 20$ Mev p	~ 1ma	$\lesssim 0.1$ ma
FM cyclotron (synchrocyclotron)	\lesssim several \times 100Mev p	~ 1 μ a	$\lesssim 0.1$ μ a
SF cyclotron ^{b)}	several \times 10Mev p, d, α	~ 1ma	0.1ma
p-linac ^{c)}	a few \times 10Mev p	~ 0.1 μ a (duty cycle ~ 0.1%)	
heavy ion linac	10Mev/nucleon	~ 1 μ a	
tandem van de graaff ^{b)}	20 Mev p	10 μ a	

表 2.2 への註

- a) d, α, H^3, He^3 等も加速できる。
- b) heavy ions も加速できる。
- c) AGSの injector としての p-linac は peak current で $\sim 100\text{ma}$ を出している。
しかし “低エネルギー” 用の大強度 p-linac はできていない。

§ 1.2 radiation について

放射能でよくつかう単位は

$$1 \text{ curie} = 3.7 \times 10^{10} \text{ disintegrations/sec}$$

$$1 \text{ R} = 87.8 \text{ ergs/g air}$$

$$= 5.49 \times 10^7 \text{ Mev/g air}$$

であるが、carbon 中で 1 R を発生するのに必要な beam の flux は minimum ionizing の singly charged particles では

$$3 \times 10^7 \text{ particles} \quad (1.3)$$

1 Mev の photons では 0.9×10^9 photons

である。従って 1ma をこえる大強度 proton beam は carbon 中で 2×10^6 R/sec をこえる放射能を induce する。(1.3) にあげた数値は他の物質についても factor 2 以内で正しいので、大強度 beam を加速・処理する meson factories とその周辺における放射線対策は第 1 級の重要な課題となる。同じ問題は CERN や BNL の AGS 改造計画にあたっても生じている。

尚 CERN の SC (600 Mev p) や UCLRL の 184" cyclotron (740 Mev p) などでは、internal beam を $5\mu\text{a}$ 以上にすると、heavy radioactivity の為 remote handling 及び servicing techniques が必要となるとされている。これらの machines の現在の強度は約 $2\mu\text{a}$ (internal) であることに注意しておこう。meson factory で加速及び測定装置の放射線対策の規模はおして知るべきである。

II meson factories

§ 2.1 meson factories とは何か?

meson factory なる名は 1960 年のはじめに生まれた新語である。

meson factory は既存の FM cyclotron (即ち synchrocyclotron = SC) で得られるものに比べて (少くとも) $10^3 \sim 10^4$ 倍 intense な low-energy の π 及び μ meson flux を作ることを目標とする加速装置のことである——中間子の大量生産工場とでも訳すべきか。

勿論 high energy proton beam 発生用の AGS は high energy の mesons を多量に作り出し得るが, low energy の clean meson beam を得るのには適していない。meson factory は background ができる丈少くて, clean conditions の下に, 精密測定用の low energy pion 及び muon beam を与えることに主眼がある。

ここで参考の為に, 昔の pion flux を引用しておこう。かつて Fermi とその協力者たちが π^\pm -p 散乱の実験 (世界初演) をしたときの pion beam は, 450 Mev の Chicago の SC より得たもので,

π^+	{	78Mev	36000/min	
		110Mev	6000/min	
		135Mev	900/min	
π^-	{	120Mev	230000/min	
		144Mev	65000/min	
π^-	{	169Mev	190000/min	(94% π^-)
		194Mev	53000/min	(96% π^-)
		210Mev	35000/min	(98% π^-)

でエネルギー巾はそう小さくなかった。今では, 例えば CERN の SC (600 Mev p, 55 pulses/sec, 1957 年完成) は internal beam が average で $\sim 2 \mu\text{A}$, extracted p beam は 5×10^{11} p/sec であって, これより得られる $\Delta p/p \sim$ 数% の

$$\pi^\pm \text{ beam は } 10^5 \sim 10^6 \pi/\text{sec}$$

$$\mu^\pm \text{ beam (stopped } \mu^\pm \text{ を含む) は } \sim 10^4 \mu/\text{sec}$$

に達している。UCLRL⁵⁾ の 184" cyclotron (740 Mev p, 64 pulses/sec, 1954 年完成, 1957 年改造完了) や Columbia の Nevis cyclotron (385 Mev, 60 pulses/sec, 1956 年完成) も夫々 $\sim 2 \mu\text{A}$, $\sim 1 \mu\text{A}$ の average internal beam を出している。

現在の SC で得られる π -beam の更にくわしい資料を表 2.1 に示す。

表 2.1 (1965 年末の data)

	600 Mev		740 Mev	680 Mev
	CERN		184" cyclotron	Dubna
	SC-Stochastic		Berkeley	(2.3 μA)
E_π (Mev)	Internal		Beams (Fast)	
	π^-	π^+	π^-	π^+
	per. sec.		per. sec.	
			per. sec.	

70	<u>30K</u> <u>56K</u>				<u>80K</u> <u>70K</u>
90	120K 50K				
100	140K <u>40K</u>	8K	42K		
125	180K 9K				<u>300K*</u>
135	<u>250K*</u>				
150	<u>200K</u> <u>5K</u>	15K	102K		<u>40K</u> <u>45K</u>
180	<u>200K*</u>				
200		20K	<u>300K*</u>		
250	100	15K	<u>600K*</u>		
265					
300	<u>70K</u>			<u>3M</u> <u>1.3M*</u>	<u>40K</u> <u>240K*</u>

(註) $M = 10^6$ $K = 10^3$

underlined beams are measured,

others calculated

All beams reduced to $\frac{\Delta p}{p} = 4\%$ (full width at half maximum)

+ : produced by $p+p \rightarrow \pi^+ + d$.

* : Muon Channel.

meson factoryはmesonsの中でも軽い π 及び μ を大量生産する加速装置を指すので、pion factoryという方がより適切であろう。pion factoryのlogical extensionとしては、K mesonやhyperonsの大量成産を目標とするkaon factoryが考えられる。後述するように“低エネルギー”のpion factoryでさえ実に高くつく装置なので、kaon factoryについては、名前はつけられても、正面からとりあげる程の段階には来ていない。尤もようやく軌道に乗りはじめたBNLとCERNのAGSの改造計画は、これ等のAGSをしてkaon factoryの方向に近づけしめる第1歩と看做すことができる。ずっと先には、anti-baryonを大量に生産するantimatter factoryを論じ、antimatterの学術的・社会的効用を議論する時もある。

§ 2.2 meson factoryに対するCriteria

加速装置がpion factoryとしてoptimumに用いられる為のcriteriaをあげてみよう。さしあたって考えられるものとしては、

(I) 500Mev ~ 1000Mevにprotonを加速できること、

数百 Mev 以上でないと pion をつくれぬ。又あまり高いエネルギーになると、装置が高
くつくし、又 clean pion flux at low energies と consistent にならない。

(II) beam current は少くとも 0.1 ~ 1ma 以上であること。

さもないと pions の大量生産はできない。heavy radioactivity と cost よりみてでき
る丈 high intensity にしたい。

(III) internal beam を extract する efficiency が極めてよいこと。

もし大強度の internal beam を外へ“全部”とりだせないとすると、加速器(と特に in-
ternal target の周辺)が heavy radioactivity にさらされ加速器の材質、運転・保存、
修繕について重大な支障をきたす。事実上 100% extraction を保障できる器種にすべきで
ある。

(IV) proton の energy を変えられること、いろいろな energy の nucleon 及び meson
beams の得られることは、可能な研究範囲を広げるものだからである。

(V) macroscopic duty cycle の大きいこと。

実験に便利のために、

(VI) polarized proton を加速できること。

これも研究できる範囲を格段にひろげるからである。

pion factory はこれらの条件をみたすものとして設計されねばならぬ。

§ 2.3 pion factory を用いた研究

pion factory はまだ紙の上を書いてあるだけで、実際に運転はおろか、建造中のものさ
え一つもない。beam intensity がぎりぎり前節の (II) に達する baby 型 pion factory が
今 Zurich 郊外で建造されつつあるに止まる。それは ETH グループが建設中の 510 Mev p,
0.08ma (average) の ring accelerator と呼ばれるものである。

加速器も含めて実験室装置や物理のテーマについて将来を卜することは事実不能だから、今
pion factory が available であるとしたら、行方であろう研究テーマについて論ずるこ
とにしよう。

前節にあげた criteria をみたす装置があれば、 π , μ flux のみならず、intense nu-
cleon beam も含めて、種々多様な用途が考へられる。それを列記してみれば

(I) 核物理の研究

核子-原子核散乱

” ” 反応

π 中間子-原子核散乱

μ " - " " (polarized μ の利用も含む)

中間子原子 (mesic atom) での中間子の核吸収

中間子-原子核反応

(ii) 素粒子物理の研究

μ 中間子の捕獲過程

中間子の電磁的性質

中間子の稀な崩壊過程

中間子原子の物理学

核子-核子散乱

中間子-核子散乱

π 中間子発生

中性微子による反応

(iii) 物性論的研究

○ radiation damage 等

(iv) 放射能の研究・利用

○ radio isotope の製造

(v) (iv) 生物学・医学的な研究

陽子を用いた biomedical research

(例へば, radioactive knife 等)

π^- 中間子を用いた biomedical effects

(vi) (iv) 強力な中性子及び γ 線の源としての応用

(vii) (v) 動力源としての利用

これ等の項目は SF cyclotrons に関する Conference で話題となっているものである。

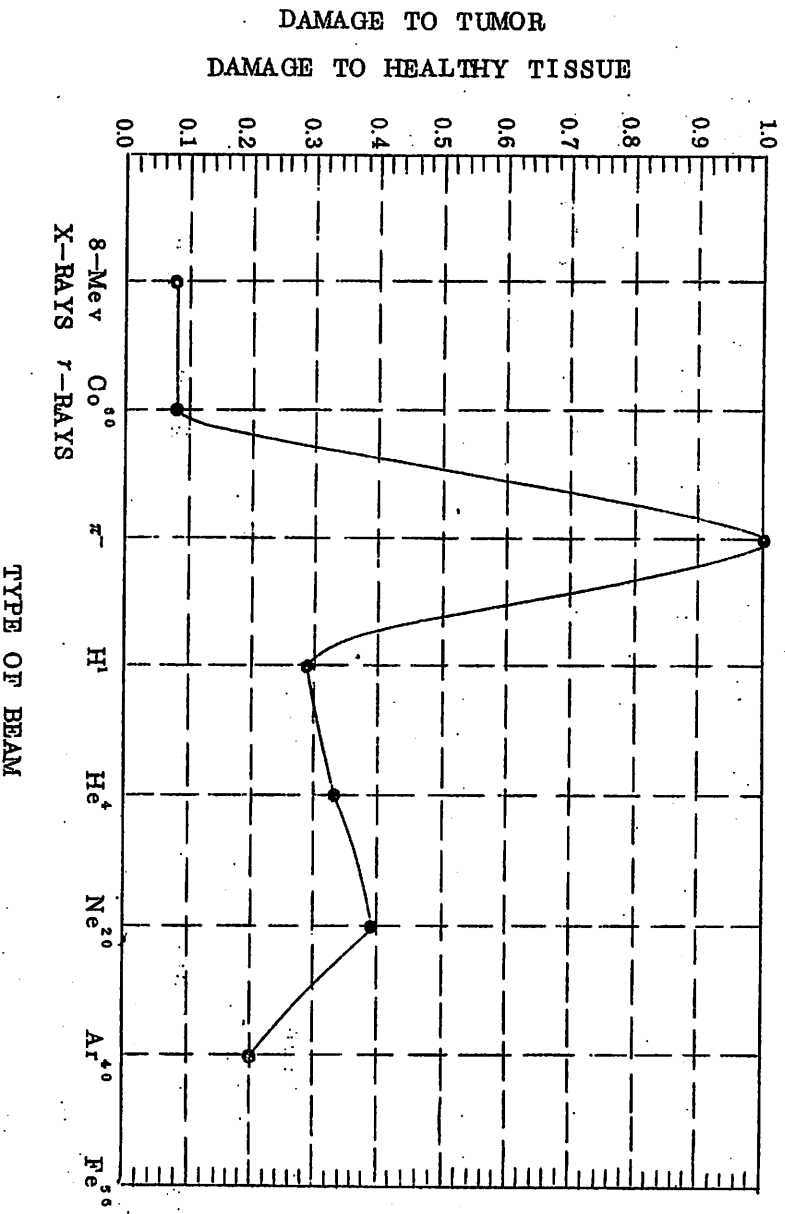
尚核子とかいたものは、陽子のみならず、それより得られる中性子も含めたものであり、且つ polarized nucleon の使用も含まれたものと了解されたい。又単に中間子とかいてあるのは π 及び μ 中間子のつもりである。

(i) や (ii) については今更詳しい説明を要しない。

(iii) 以下につき若干の補足をしておく。

つよい核子及び核粒子線があれば、今迄以上によい biomedical research が行える。特に π^- の biomedical effects は面白い。それは π^- が stop するまで失う ionization は p や α などに比べて小さいが、とまった π^- が生体組織をつくる(軽い)原子核にすわれるときに原子核を破壊して大きな energy 従って強力な radiation を放出させる。 π^- は局所的に radiation を大量照射するのに甚だ適している(図 2.1 をみよ)。

遅い中性子 (n) や γ 線の強力な源としては、従来原子炉や electron linac が使われてきた。数 10 ma 以上の $\lesssim 1$ Gev proton machine (強力な pion factory) が出来れば、それは画期的に有効な n 及び γ 源となる。 ~ 1 Gev proton を heavy target にあてて spallation-



Irradiation of Tumor Extending from 10 cm to 15 cm Inside
Organism [Calculations by Prof. P.H.Fowler, Proc. Phys. Soc.
(London)85, 105(1965)]

図 2.1 Graph showing relative damage to tumor and
healthy tissue resulting from irradiations
with x rays, γ rays, pions, protons, and heav-
ier nuclei, respectively.

evaporation を cascade 的におこさせ (適当な moderator と組合せ) れば極めて intense な n 及び r 線を得ることからである。Canada の CRNL の proposal によれば、彼等の design した machine (1 Gev の三段 SOC 又は p-linac) によって得られる n-deam は同じ値段の powerful nuclear reactor よりずっと強いという。それで CRNL のグループは彼等の propose した accelerator に ING (intense neutron generator) という名をつけている。

既存の原子炉で得られる thermal neutron flux は several $\times 10^{15}$ n/cm² sec であつて、 10^{16} n/cm² sec 以上を fission 利用原子炉で得るのは cost 点から formidable とされている。それに対し ING では 1 Gev, 80 ma の proton flux を Pb-Bi target にあてて約

$2 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ が得られると推算されている。

最後の動力源としての pion factory の利用は可能性ありというにすぎないが、傑作な idea である。pion factory で得られた proton beam の一部を使って intense nucleon flux をつくり、後者を U^{238} (の如き thermal neutron では chain reaction の起らない material) を核分裂させて、その時に放出されるエネルギーで発電をする。こうして得た電力でもとの pion factory (その他) を運転させようという idea である。超強力 pion factory をつくって、pion factory 用というよりも動力専用にするという可能性もあり得よう。これは (i) ~ (iv) に比べれば、進化の度の低い、技術的な夢というべき段階である。

(vi)

§ 2.4 pion factory としての加速器

前に § 2.2 にのべた criteria をできるだけよく満足する加速装置としては、従来の FM cyclotron (synchrocyclotron) では駄目であって、SF cyclotron³⁾ やその精巧な進化型である SOC⁴⁾ とか、p-linac をつかわねばなるまい。

H^- ion を加速する SF cyclotron や SOC は design 作製者の言い分を信用すれば、§ 2.2 の criteri をすべて満足している。

それに対し p-linac は (v) 以外のすべてをみたしている。しかし現状では (v) の duty factor が極めて poor である。この欠点をのぞくために目下 (e 用に) 開発されつつある super conducting RF cavity を応用して duty cycle を上げるとか、storage ring に p-beam をたくわえておいて beam の time structure をけずるなどの方法を発展させなければならぬ。

SF cyclotron や SOC では外側程磁場を強くする必要があり、一台で高エネルギーの proton beam を得るのはむずかしい。それで ORNL (と CRNL) の 1 Gev pion factory の案ではまず

linac で 10 Mev p をつくって

10 ~ 50 Mev の SOC

50 ~ 350 Mev の SOC

350 ~ 1000 Mev の SOC

と三つの SOC を併用して 1 Gev p をつくる案を出していた。今建造中の ETH の ring accelerator は SF cyclotron で 68 Mev の p をつくりそれを SF 型の ring accelerator に入れて 510 Mev まで加速することになっている。これによって単一の SF cyclotron としたとき最も困難な二つのことを (中心部及び外側の大強度磁場) をさけているわけである。

数段の SOC をうまく連動させることは、紙の上ではともかく、実際上は非常にむづかしいこ

とらしい。最近のニュースによると Canada の CRNL でも，USA の LASL でも多段式 SOC はやめて p-linac をつくるという計画にかえたいらしい。特に LASL の p-linac は Yale University から大分前に propose されたものをひきついで plan で，その建設がほぼひとめられたという。

	Zurich	LASL	CRNL
	ring accelerator	linac	3-stage SOC
average current (ma)	0.08	1.2	80
energy (Mev)	510	750	1000
energy variable (Mev)	No	200-750	10-1000
macroscopic duty factor (%)	100	6~12	100
over-all size of accelerator (ft)	43φ	2000×17	47φ, 93φ 157φ
accelerator cost (10 ⁸ dollars)	7.0	20.0	132*
cost of project (10 ⁸ dollars)	21.3	55.5	157*
To operate in	1971/12	1971	?

表 2.2 meson factories

* (100万カナダドル)

factor

§ 2.5 beam structure

duty factor は実験を考える時大切な factor である。そこで稼動及び design 中の machine で得られる (internal) beam の time structure をまとめておく。

FM cyclotron 0.1ms 位の beam on と 20ms 位の beam off のくりかえし，0.1ms の beam の中に更に RF structure あり，UCLRL, CERN, Columbia 等の SC では subsidiary accelerating electrodes や moving targets など macroscopic duty factor をかなり改良して 50~80% に達している。しかし microscopic duty factor は RF structure が残るため 10~15% の辺に止まっている。RF structure を消すには internal beam に beam stacking をほどこすとか，extracted beam を storage ring に入れる等の方法がある。

proton linac (Yale のデザイン, 750Mev, peak current は 20mA)

microscopic structure

0.07ns の pulse が 5ns 毎に 4×10^5 回つづいて 2ms spread の

“beam”をつくる。

macroscopic structure

2msの“beam”が例へば40ms毎にくりかえされる。

macroscopic duty cycleは6~12%。

H⁺ SF cyclotron (UCLAのデザイン, 700Mev)

microscopic structure

4ns pulseが40ns毎にくりかえされる

macroscopic structure

constant working

H⁻ SF cyclotron (UCLAのデザイン 700Mev)

microscopic structure

32ns pulseが80ns毎にくりかえされる。

macroscopic structure

constant working

CERN-PS (10^{12} p/pulse/2.3 sec at 25Gev) 比較のために

microscopic structure

6nsの bunchが105ns毎に20回くりかえされて1 pulseを作る。

1 pulseの長さは2.1 μ s.

macroscopic structure

1 pulse/2.3 sec at 25Gev

1 pulse/5 sec at 28Gev

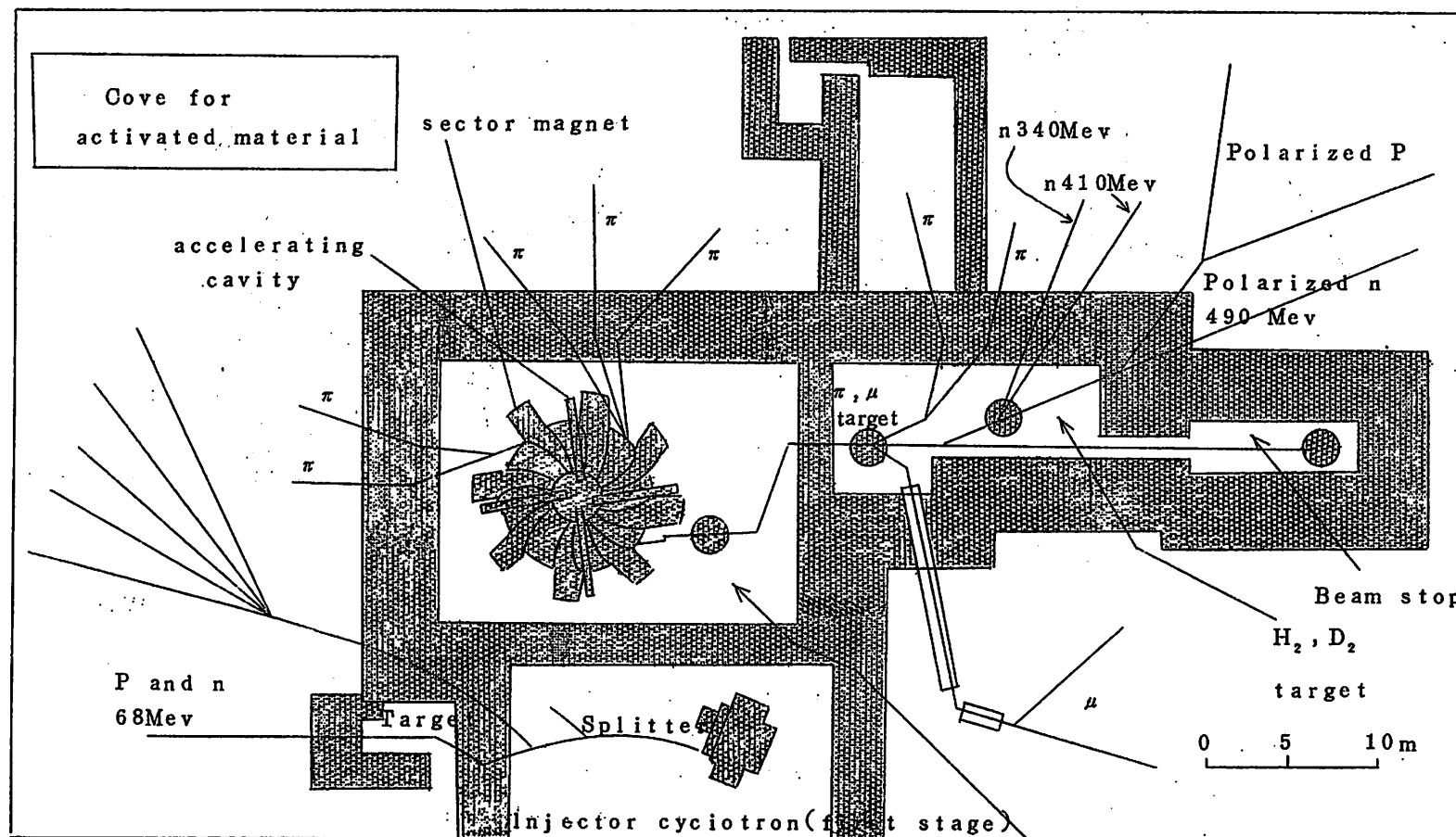
III おわりに

以上でmeson factoryについての仮想見聞録をおわる。

実際の加速装置として pion factoriesには技術的に開発を要することが多く、加速器学的にきわめて面白いものであるにちがいない——しかし表2.2に記したように極めて高価な器械なので誰にでも作れるというわけにはゆかないにもせよ。

図2.1, 図2.2にZurichのring acceleratorとCRNLの3-stage SOCの配置を示した。(1967年後半になって、CRNLはそのmeson factory計画をSOCより1Gevのp-linacにきりかえた。)

Layout for Zurich meson factory shows particles available from low-and high-energy stages of accelerator



-79-

2.2.

Degrader Ring accelerator (high energy stage)

SWITCH

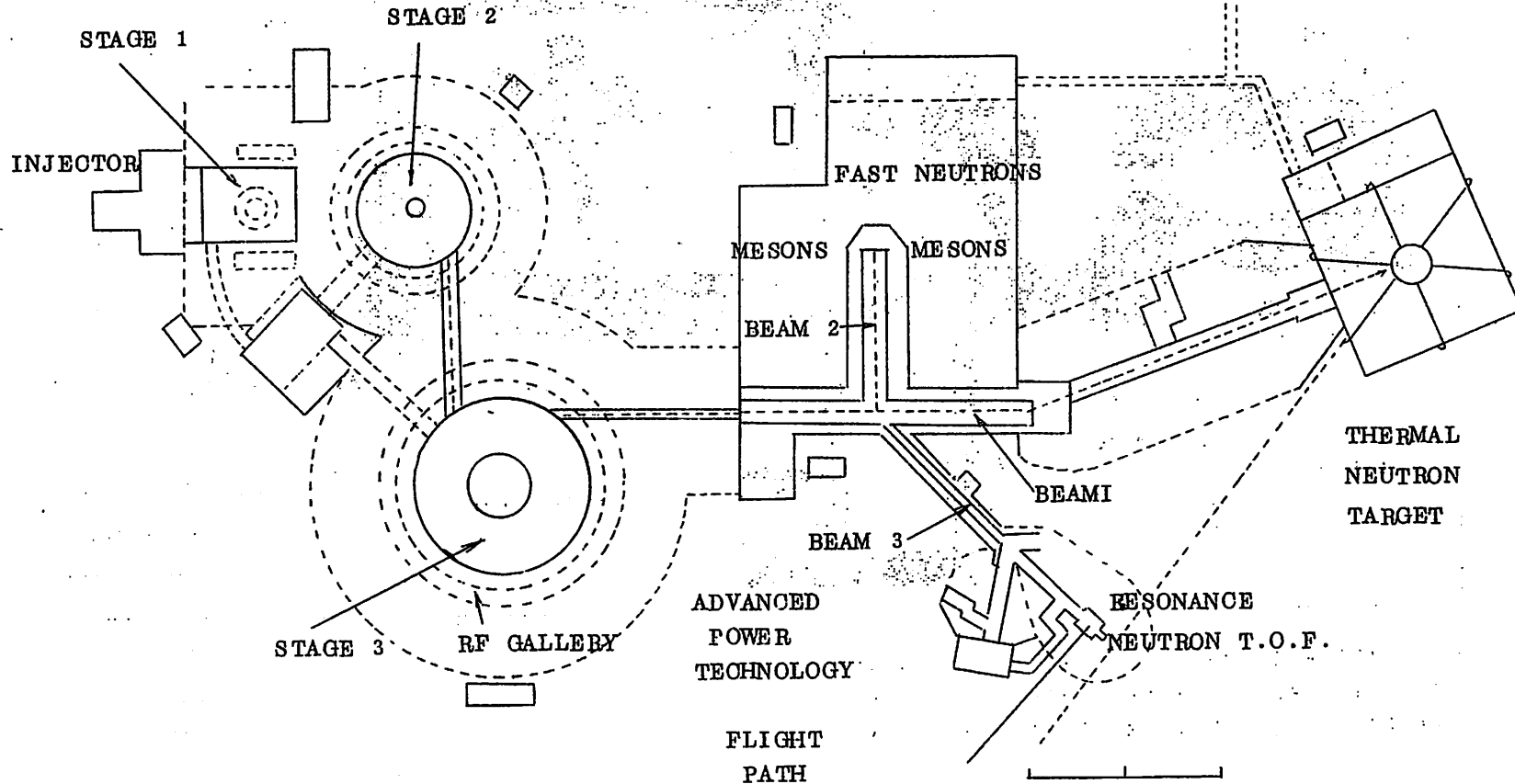
Layout of ING project. (CRNL)

2.3

injector	10 Mev linac
stage 1	10-50 Mev
" 2	50-350 Mev
" 3	350-1000 Mev

OFFICES AND CONTROL

-08-



protonのように安定(又はneutronのように準安定)な粒子のbeamとちがって, meson beamはmesonが不安定なために一旦高純度のbeamを得たとしてもその寿命の程度の時間で不純(decayのため)になってしまうから, intense meson beamには新しい取扱上の技巧を要しよう。

又加速の新機構が発見されて π , μ の如き不安定粒子を“加速”することができれば新しい領域が開拓できよう。

Zurichのring acceleratorが発足し, LASLのp-linacもつくられそうになってきたが, 本格的なmeson factorは今後の問題である。特にmeson factorに最も適した加速装置を考え出すのもこれからの課題である。

素粒子物理にとってmeson factoryが不可欠とは思わないが, 広い研究領域, 特に多くの精密実験のできる可能性を考えると, やはり世界的にいくつかあって然るべきものと思われる。我国でも余り低エネルギーのかたい壁にとじこもらないで, meson factoryにsymbolizされる中エネルギー領域の研究がはじまることを期待したい。

1) この会議は1959, 1962, 1963, 1966年に開かれ, それ等のproceedingsは次の通りである。

1959 : Nat. Acad. Sci. & Nat. Res. Council, publication 656.

1962 : Nucl. Instr. and Meth. vol 18~19.

1963 : CERN 63-19

1966 : IEEE Trans., vol NS-13, No 4

2) 1963年Dubna, 1965年Frascatiの会議でmeson factoriesがとりあげられている。

3) SF cyclotronはsector-focused cyclotronの略。これはAVF(azimuthally-varying field) cyclotronと呼ばれる。この型の原理はThomasが大分前にproposedした:

L.H.Thomas, Phys. Rev. 54(1938) 580-598.

4) SOCはseparated orbit cyclotronの略で, いわばlinacをまるくならべてつくったisochronous cyclotronである; sector magnetと加速cavityが円周上にならびSF cyclotronのよい性質をすべてひきついでいる。F.M.Russellが1963年CERNで開かれたSF cyclotronのconferenceでproposedしたものである。

5) 研究所の略号は次の通りである。

UCLRL Lawrence Radiation Laboratory, University of California

B ~~ORNL~~ Brookhaven National Laboratory
C ~~ORNL~~ Chalk River National Laboratory
ORNL Oak Ridge " "
LASL Los Alamos Scientific Laboratory

補遺(1968年7月)

Prsceedings of the Sixth International Conference on High Energh A-
ccelerators, 1967 より meson factories にかんする表を 2~3 pick up して以下に
示す。少しでも up to date ならしめるためである。

まづ表 I は propose されている meson factories の比較表である。次に Los Alamos
Scientific Laboratory に建設されるはずの meson factory — Proton linac — の
デザイン・パラメタを表 II に示し, この加速器より得られる pion 及び muon beam inten-
sities を表 III, 表 IV にのせた。

Comparison of Proposed Meson Factories

	H ⁻ Cyclotron	Spiral-ridged Cyclotron		Ring Cyclotron	LINAC	
	TRIUMF ^a	Columbia	Dubna	Zurich	LASL	CRNL
Energy (MeV)	200-500	550	700	510	100-800	100-1000
Energy resolution (%)	0.3		0.4	0.4	0.4	0.4
Average current (mA)	0.1	.005-.04	0.5	0.08	1	65
Beam extraction (%)	100	90	90	90	100	100
Macro-duty factor (%)	100	50	100	100	6-12	100
Micro-duty factor (%) ^b	25-100	25	25	25	5	5
Time between micropulses (psec)	20	50	20	20	5	5
Possibility to increase energy	no	no	no	no	yes	yes
Polarized beam intensity (μA)	.02		0.01		1	1
Beam emittance (milliradian cm)	0.2		2		π	π
Cost of facility (millions of \$)	18	5	24	21 ^c	55	175
Funding situation		Funded		Funded	Partially Funded	
Completion date	1972	1970	1972	1971/72	1971	

^a Tri-University Meson Facility, Vancouver.

^b In the LINAC, because of the high frequency of beam modulation, it is feasible to smooth out the microstructure at some cost in either maximum energy or energy spread. Elimination of microstructure does not appear to be feasible in the circular machines.

^c This amounts to approximately \$3 for each inhabitant of Switzerland

表 I Comparison of some proposed meson factory accelerators.

DESIGN PARAMETERS FOR THE LOS ALAMOS LINAC (LAMF)

Ion Source: Duoplasmatron - 30 keV
Preaccelerator: 750 keV Pierce-type short column

Alvarez Accelerator:

Frequency 2.0125×10^8 Hz

Structure - Alvarez, 4 tanks

Tank 1 - 0.75 - 5.0 MeV

2 - 5.0 - 41.2 MeV

3 - 41.2 - 72.3 MeV

4 - 72.3 - 100.3 MeV

Waveguide Accelerator:

Frequency 8.050×10^8 Hz

Structure - side-coupled shaped cavities
π/2-mode standing wave

Number of tanks - 90

Current: Peak - 17 mA
Average - 1 mA

Duty Factor: 6 - 12 %

Overall Length: 850 m

Peak RF power for cavity excitation 38 MW
" " " " beam excitation 14 MW

Total 52 MW

Average RF power (6%) 3 MW

表 II Design parameters for the Los Alamos Linac (LAMF).

Pion Beam Intensities

Pion Energy (MeV)	Pion Production Cross Section* (cm ² /sr-MeV)	λ Pion Decay Distance (ft)	Positive Pion Intensity (per Sec)	Negative Pion Intensity [†] (per Sec)
100	10 x 10 ⁻³⁰	34.9	2.8 x 10 ⁸	5.9 x 10 ⁷
200	25 x 10 ⁻³⁰	55.5	2.8 x 10 ⁹	5.9 x 10 ⁸
300	50 x 10 ⁻³⁰	74.6	1.1 x 10 ¹⁰	2.4 x 10 ⁹
400	20 x 10 ⁻³⁰	93.4	7.0 x 10 ⁹	1.6 x 10 ⁹
500	5 x 10 ⁻³⁰	111.6	2.4 x 10 ⁹	5.3 x 10 ⁸

Conditions:

1 mA average proton beam = 6 x 10¹⁵ protons/sec at 800 MeV;

18 g/cm² Be target;

3 x 10⁻³ sr pion channel acceptance;

$\Delta p/p = 6.7\%$, total momentum acceptance of the pion channel;

43-ft channel length.

* Values calculated by Los Alamos Monte Carlo Cascade Code.

[†] Cross section for negative pions taken as 1/4.5 times that for π^+ ; ratio calculated by Cascade Code.

表 III Some kinds of pion beams achievable with 1 mA of 800-MeV protons.

Muon Beam Intensities

Pion Energy (MeV)	Mean Muon Energy (MeV)	Positive Muon Beam Intensity per Sec		Negative Muon Beam Intensity per Sec	
		52-Ft Channel	100-Ft Channel	52-Ft Channel	100-Ft Channel
100	68	2.1 x 10 ⁸	1.3 x 10 ⁸	4.6 x 10 ⁷	2.8 x 10 ⁷
200	162	1.2 x 10 ⁹	8.0 x 10 ⁸	2.6 x 10 ⁸	1.8 x 10 ⁸
300	240	3.2 x 10 ⁹	2.4 x 10 ⁹	7.1 x 10 ⁸	5.2 x 10 ⁸
400	320	1.5 x 10 ⁹	1.2 x 10 ⁹	3.4 x 10 ⁸	2.6 x 10 ⁸
500	400	4.3 x 10 ⁸	3.4 x 10 ⁸	9.6 x 10 ⁷	7.6 x 10 ⁷

Conditions:

1 mA average proton beam = 6 x 10¹⁵ protons/sec at 800 MeV;

30 g/cm² Be target;

Solid angle acceptance = 4 x 10⁻³ sr for 52-ft channel; 3 x 10⁻³ sr for 100-ft channel;

$(\Delta p/p)_\pi$ = momentum acceptance of pion channel = 15%;

$(\Delta p/p)_\mu$ = momentum interval of muons used at output = 25%;

F = probability of muon remaining in channel = 0.15 for 52-ft channel and 0.10 for 100-ft channel.

表 IV Some kinds of muon beams achievable with 1 mA of 800-MeV protons.