高エネルギー核実験におけるミニコンピュータの利用[†]

藤 井 忠 男

東京大学原子核研究所

東京都田無市緑町 3-2-1

1. 序にかえて

最初に 2 つの点についてお断りしておきたい。その 1 つとして標題の「高エネルギー核実験」とは「高エネルギー加速器 (1 GeV 以上) からの粒子ビームを用いた素粒子ならびに原子核に関する実験」の意味であって、内容としてはむしろ素粒子実験に関するものが多いので文中では「高エネルギー実験」と略称させていた。第 2 の点は筆者はあらゆる意味でコンピュータの専門家ではなくただこれまで種々手がけてきた高エネルギー実験にコンピュータを利用してその恩恵の一端に浴した実験屋の一人に過ぎないことである。したがってこの解説の筋道としては、高エネルギー実験の一側面をコンピュータ利用の観点から紹介し、とくにミニコンピュータがいかに用いられているかを少数の実例で平易に述べることに重点をおき、用いられたコンピュータ自身に関する詳細な情報には立ち入らない。これはまたこの分野で現在までに用いられたコンピュータの機種は千差万別であり、実験方法およびコンピュータ技術両面での急激な発展により、今日のシステムは短時日のうちに次代のシステムにおきかえられる宿命にあるので、文中にあげる機種はその時点での 1 つのシンボルとしての意味をもつに過ぎないことにもよる。

2. 高エネルギー実験におけるコンピュータの一の必要性

近年世界の各国において粒子加速器が建設され、そのエネルギーおよびビーム強度が増大するとともに、物質の構成要素としての素粒子の性質およびその相互作用の法則を解明するうえで貴重な成果をあげつつある。この素粒子物理学の進展の基盤となる高エネルギー実験の遂行ならびにデータ処理に、コンピュータが必要欠くべからざる道具として認識されるに至ったのはおもにつぎの理由によるものと考えられる。

(i) 物理学上の要請からより精密な実験を行なうには必然的に、測定器のエレメントを細分化して粒子の位置、角度、運動量等の精度向上をはかり、かつ広範囲のパラメーターを同時にカバーするために装置全体は大型化する。一方統計精度をあげるには目的とする現象を多量に記録しなければならない。したがって実験で収集するデータの量は飛躍的に増大し、これを短時日で処理し得るものとしてはコンピュータが唯一の手段となる。この顕著な例として図 1 に π 中間子-核子散乱実験の十年間における変貌を示す。上図は 1950 年代の初期にフェルミらがシカゴ大学のシンクロサイ

図 1 π 中間子-核子弾性散乱実験の比較

[†] The Use of Mini-Computers in High Energy Physics, Tadao FUJII: Institute for Nuclear Study, The University of Tokyo, 3-2-1 Midori-cho, Tanashi, Tokyo.

クロトロンからの 100 MeV 前後の π 中間子を用いて散乱実験を始めたときの配置図である¹⁾。水素標の前後の入射粒子および散乱粒子を検出するために 2 対のシンチレーションカウンターを用い、このデータ処理も数個のバルス増巾器、同時計数回路、スケーラー等の組合わせで事が足りた。これに比べ 60 年代にブルックヘブン研究所で行なわれた数ないし数十 GeV 領域での散乱実験²⁾には運動量解析用電磁石、粒子弁別用チェレンコフカウンターおよび数百本のカウンターホドスコープ等から成るスペクトロメーターを用い、トレーラーに満載した複雑な回路系で現象を選択したのち、すべてのデジタルおよびアナログ出力をオンラインコンピュータに入れて 1 時間あたり数万ないし数十万の散乱現象の即時解析を行なうようになった。

(e) 上の例でもみられるように加速器のエネルギーが増すにつれて 1 種類の入射粒子に対しても起こりうる反応の数も増大するので、目的とする反応を他の多くのバックグラウンドの反応から識別するためには検出装置が複雑化し、1 個の現象について測定すべき情報の種類も多くなる。これらの物理的意味は個々の情報の集積のみでは判断がつかず、種々の情報の間の相互関連性について解析を行なうのち初めて明らかになることが多い。従来 1 ないし 2 次元の解析には pre-programmed computer ともいうべきいわゆる“波高分析器”が用いられたが、さらに多次元のパラメーターの解析にはコンピュータがより有効であり汎用性に富んでいる。

(f) 現在稼動中の高エネルギー加速器を使用する実験の要求は年々増大し、その結果として 1 つの実験の提案と実施の間に年単位の時差があることも珍しくない。したがって同じ実験を短時日の間に繰り返すことはむずかしくまたそれに投入される人力、費用等を考慮すると、その実験の成否を左右するような測定中のミスは非常に高価につくことになる。これを避けるために測定器に直結されたオンラインコンピュータを用いて複雑な測定器系、加速器系、ビーム輸送系等の作動状況をつねにモニターしたり、集積されたデータを即時解析してその予備結果を測定中にフィードバックすることが実験能率を向上し最終的な成果をあげるうえで非常に重要になってきた。

(g) 最近の固体物理学、電子工学の発展により、コンピュータの性能および信頼度が著しく向上し、かつ廉価に入手できるようになった。また各種のデジタルモジュールや最近の CAMAC システム³⁾の開発等により、測定器とコンピュータとのつながりが比較

的容易になり標準化されつつあることも、実験技術としてのコンピュータの利用を促進した要因の 1 つにあげることができよう。

3. ミニコンピュータの特殊性

前節で述べたように高エネルギー実験においてコンピュータに期待される役割は多種多様であり、これらを 1 つの機種で満足させることは技術的に種々問題があるばかりでなく、往々にして経済的でもない場合が多い。実験の最終結果を導くために必要な過程としての複雑なデータ解析、モンテカルロ・シミュレーション、 χ^2 フィッティング、物理計算等にはそのプログラムの膨大さからも、100K 程度の主記憶装置、1 μ sec 以下のメモリーサイクルをもつプロセッサを中心に数台の磁気テープ装置、大容量ディスク、高速ラインプリンター等の周辺機器を整備した大型の中央計算機が必要なことは言をまたない。一方実験用測定器は種々異なった特性をもち、その出力のフォーマットもさまざまで、かつランダムシーケンスで出ることが多い。これらを直接大型コンピュータに入力させることは、そのハードウェア、ソフトウェア両面を複雑化し、しばしば中央計算機としての本来の機能を低下させる原因になることもある。この問題を解決するうえで、最近小型化、機能化への進歩のめざましい半導体素子を用いたミニコンピュータを個々の測定器と有機的に結合させ、ある特殊な目的に限って単能的に用い、中央計算機が数台のこれらのミニコンピュータと交信して総合的な目的を達成するという傾向が顕著になってきた。この場合ミニコンピュータの果す機能を大別すれば

- (1) タイムシーケンス調整を兼ねた一時的なバッファーストレージ、
- (2) 以後の解析に適したフォーマットに整えるためのデータ操作、
- (3) 大型計算機の負担を軽減するための簡単な論理演算による現象の選別、
- (4) 簡単なプログラムによる予備解析、
- (5) オシロスコープを用いた種々のグラフ表示、
- (6) 装置の現状を監視するためのデータロギング
- (7) 簡単な方式によるプロセス制御、
- (8) データの磁気テープ書き込み、カードパンチ、通信線への転送、

等があげられる。なおこの方式では個々の測定器の特性に適した廉価な機種を選ぶことができる利点もある。

以下に高エネルギー実験の種々な段階で、ミニコンピューターがいかに利用されているかを、二、三の実例について紹介する。

4. カウンター実験のオンラインデータ処理

シンチレーションカウンターホドスコープやワイヤー放電箱等の粒子検出器はその出力がすでにデジタル化されているのでコンピューター処理に適しており、これらを用いた実験のオンラインデータ解析はすでに十年前米国ブルックヘブン研究所で始められて以来^{2),4)}、諸外国の高エネルギー研究所において種々の方式で実施されてきた。筆者の属する東京大学原子核研究所においても1964年に電子シンクロトロン実験用ミニコンとしてDEC社のPDP-5が導入されて以来、さらにPDP-8やサイクロトロン実験用としてPDP-9が付加され、データ収集、2次元波高分析、簡単なオンライン解析⁵⁾等に使用されてきたが、昨年中央計算機として東芝のTOSBAC 3400/41が設置されたのを機に、これを上記の周辺ミニコンと接続し、マルチプログラミング方式で通常のパッチ処理と同時に本格的なオンラインデータ処理が実施できるようになった。ここでは最近荷電中間子の光発生の実験⁶⁾に用いられた方式について述べる。

図2にみられるように核研1.3 GeV電子シンクロトロンからの高エネルギー γ 線を液体重水素標的に入射し、発生した荷電 π 中間子を700 MeV/C スペクトロメーターで検出する。スペクトロメーターは粒子運動量解析用の電磁石を中心に3個のトリガーカウンター、3台のカウンターホドスコープ、電子識別用のガ

スチレンコフカウンター等の測定器が標的を中心とする回転台の上に設置されている。標的から発生した粒子がこのスペクトロメーターを通過すると図3に示されるようにトリガーカウンター間の同時計測信号で計数回路が起動し、各ホドスコープにおける粒子の通過位置、チェレンコフカウンターの信号、電磁石前後のカウンター間における粒子の飛行時間、焦点におかれたカウンターでの粒子のエネルギー損失(波高)、加速器のビームスピルの間に現象の起こった時間、電磁石磁場の瞬間値等の情報がスイッチレジスターで与えられた諸種のパラメーターの値とともにPDPインターフェイスを通じてまずミニコンPDP-8にたくわえられる。ここで1現象ごとの上記の情報は10語(24ビット/語)のフォーマットに編成され100現象(約1 K語)のデータがたまるとにTOSBAC用インターフェイスを通じて3400のMDT(memory data transfer)入力部に1語約20 μ secの速度でブロック転送される。TOSBACにはオンライン入出力専用のDAC(direct memory access)チャンネルがあり、ステータス制御され、外部装置と主記憶装置間に語またはブロック単位の転送を行なうことができる。またシステム作成時に主記憶の一部をDAC領域と指定することにより、オンライン処理に必要なメモリーのランダムアクセスが可能となり、パッチ、オンライン両プログラムの実行と同時並行的にオンラインデータの入出力を行なうことができる。

TOSBACは入力情報をいったんディスクにたくわえたのち現象ごとに空間再構成、現象の適否判断、運動量および軌道の決定、運動力学パラメーターの実験

図2 荷電中間子光発生実験の配置図

図3 東大核研 700 MeV スペクトロメーターのオンラインデータ処理概念図

室系から重心系への変換等の解析を行ない、ホドスコブ分布、運動量分布、標的での発生位置分布、飛行時間およびエネルギー損失分布、ビームスビル分布等を示すヒストグラムに累積する。1つのブロックのデータ処理が終ると現象ごとに解析された情報およびヒストグラムの内容をディスクの別々の領域に記録し、累積されたヒストグラム情報を再びMDTおよびインターフェイスを通じて逆に実験室に設置されたPDP-5にフィードバックするとともにつぎの入力ブロックの到着を待つループにはいる。この場合PDP-5はグラフ表示に専用され、測定中任意のときにキーボードからの命令でそれまでに累積された各種のヒストグラムをCRT画面に描かせることにより測定器全体が正常に作動しているか否かをつねに監視することができる。図4にその一例として粒子のエネルギー損失分布の表示を示す。

1回の測定を終了すると入力情報および解析情報はTOSBAC側で磁気テープに記録され、ヒストグラムその他の解析結果はPDP側のI/Oタイプもしくはラインプリンターに打ち出される。この方式で解析に要した時間は入出力転送およびディスクへの出し入れ等を含み1現象あたり約100 msecであり、オンライン解析中PDP側とTOSBAC側との対話は通信制御装置(COC)を通じてI/Oタイプライターを用いて行なわれた。

5. 泡箱写真解析

泡箱は高エネルギー実験に欠かすことのできない可

図4 PDP-5によるグラフ表示の一例

視型飛跡検出器(visual track detector)⁷⁾である。その原理を簡単に説明すると、ある種の液体(水素、重水素、プロパン等)を適当な圧力と温度で容器に閉じこめた状態で可動弁またはピストン等の方法でこれを急激に膨張させ圧力をその蒸気圧以下に下げると液体はいわゆる“過熱状態”になる。この状態の液体中を荷電粒子が通過するとその電離作用によって擾乱点が生じ粒子の軌跡に沿って泡が発生する。この泡が粒の配列として見える程度に発達した時点で強い光源を閃光させ、3方向から立体写真をとって現象を記録する。通常、容器を大きな電磁石の磁場の中に置いてい

ance) にしたり、測定の各段階で問題が生じたときにコンピューターと人間が対話を交して進めてゆくという方式で用いられることが多い。しかし現在全世界の高エネルギー研究所でとられる泡箱写真の数は年間数百万枚から数千万枚に及ぼうとしているので、この処理は今後ますますコンピューターの機能を十分活用した自動解析の方向に進むであろうことは言をまたない。

6. 放電箱写真の自動解析

放電箱は数層の薄い平行電極板から成り、その間隙はヘリウム、ネオン、アルゴンのような不活性気体と微量のアルコールのような quenching agent の混合で満たされている。荷電粒子がこれを通過したさいその近傍に置かれたトリガーカウンターからの信号によって高電圧パルスを電極間かけると粒子の通過によって生じた電離アバランシュに沿って放電が起こる。これを記録するには最近では一方の電極を多数の線におきかえ放電流をデジタル情報として取り出す場合が多いが、実験の目的によっては電極間の放電を泡箱と同様に立体写真にとる方式もある。泡箱に比べて空間分解能は $0.2 \sim 1 \text{ mm}$ で粗いがシンチレーションカウンターにまさり、かつ時間分解能が $0.1 \mu\text{sec}$ 程度で、トリガーによって写真にとる現象をあらかじめ選択できる利点がある。したがって放電箱写真はバックグラウンドになる軌跡がほとんどなく、また通常は磁場中におかれていないので軌跡も直線が多いために図形認識も泡箱の場合に比べてはるかに容易であり、コンピューターを用いた自動解析も比較的行なうことができる。

その一例である SPASS 方式^{(10),(11)}では図7で示されるようにミニコンによって座標値が指定されるオシロスコープを光源としてその像をレンズ系でフィルム上に結ぶことにより、フィルム上の放電、すなわち粒子の軌跡の位置を1点ずつ光電子倍增管で読みとって信号をコンピューターに送り、その情報に基づいてつぎつぎに走査すべき位置を定めてゆくという方式である。この方法ではフィルム上のすべての点を走査(raster scan)することもできるが、前述のように放電の位置の相対関係が簡単なのでこの条件をあらかじめプログラムで考慮に入れることにより走査の領域を限定して能率をあげることもできる。このようにして得られた軌跡の座標その他の情報は磁気テープに記録して大型計算機で解析するかあるいはミニコン自体に十分な記録容量が備わっている場合にはさらに高度の解析

図7 放電箱写真自動解析装置概念図

を続けることもできる。なお図7で見られるようにこのシステムにストレージ型のスコープを付加することにより、自動解析の進行状況を監視することもできる。ただしこのような自動解析を成功させるには光電子増倍管の信号が放電の濃淡やフィルム上のきずにより左右されやすいので放電箱自身の製作・作動および写真撮影・現像等の各過程で細心の注意を払い良質の写真を得ることが重要である。

7. 加速器の制御⁽¹²⁾

現在稼動中の高エネルギー加速器はシンクロトロン、直線加速器(ライナック)、およびコライディングマシンに大別されるがここでは普遍的な陽子シンクロトロンを例にとる。通常の陽子シンクロトロンは前段入射器として直流高電圧で数百 keV まで加速するコックロフト・ウォルトン装置、入射器として高周波電場で直線的に数十ないし数百 MeV まで加速する陽子ライナック、加速ビームを円形軌道に保つための電磁石系および真空系、円軌道で最終エネルギーまで加速するための高周波空洞等から構成されている。最近ではライナックから主リングに入射する前に中間段階として小型のブースターシンクロトロンを用いてビーム強度の増大を図るカスケード型もある。この方式で現在最大のものは約1か月前最高エネルギーの3千億電子ボルトに達した米国イリノイ州バタビアにある National Accelerator Laboratory (NAL)の陽子シ

シンクロトロンでその軌道の直径は 2 km にも及ぶものであり、わが国の筑波学園都市に現在建設中の高エネルギー物理学研究所の 8 GeV 陽子シンクロトロンもこの型に属する。

このような加速器の各部は電子的に動作するもの、機械的に動くもの等種々あるが、ほとんどが電力で稼動するものなので遠隔操作が容易である。従来は全体の運転状況をモニターし各部の調整を行なうにはコントロール室と呼ばれる 1 個所に種々の計器類、オシロスコープ、操作スイッチ等を集中的に配列してオペレーターが各部の作動状況をながめながらマニュアルに制御する方式がとられた。最近の大型加速器ではその制御対象の数が膨大になり、前述の NAL の加速器ではオン・オフ制御が 3,000 個所以上、電圧制御が 2,000 個所以上、モニターすべき個所が 7,000 以上と設計段階で予測された。このようなシステムを従来のマニュアル方式で制御するにはその制御系システムの建設費がかさみ、かつ運転能率の低下のおそれもある。これを解決するために適当な周辺機器を備えた数台の小型ないし中型コンピューターを用いて単純な制御操作を行なわしめる方法が導入された。

たとえばデジタル電圧計で電圧を測定し、結果をコンピューターに入れて、すでに記憶装置にたくわえられた過去の記録と比較し、一定値以上の差がある場合に警告を発して電圧の調整を行なうことはミニコンにとって容易なことである。また一度命令されたことを昼夜をとわず正確に繰り返す特質も加速器の制御に利用されることは工業関係のオンラインプロセスコントロールと同様である。ただ工業関係と異なることは制御内容の変更、拡張がつねに要求されることである。高エネルギー実験研究上の要請から加速器も絶えずその性能の向上を目指して改良拡張の計画が実施されている。したがってそのコンピューター制御もその流動的な進展に適応するような余裕のある柔軟な構成であることが望ましい。現在の時点では加速器のパラメーターの数が膨大でまたその相互関係が複雑であるため運転制御のすべてをコンピューターに委ねる段階にはきておらず、内容的には各部の記録監視、プログラム制御および部分的なフィードバック制御を含む程度で重要な判断はオペレーターによって下され適宜な処置を施しているのが現状であるが、コンピューターの導入により複雑な加速器の制御が容易になり運転能率が向上することが期待される。

加速器制御の実例として図 8 にスイスの欧州連合研究所 (CERN) の陽子シンクロトロンで用いられてい

図 8 CERN 陽子シンクロトロンの計算機制御システム

るシステムの概略を示す。記憶容量 40K 語 (16 ビット/語) の IBM 1800 を用いデータ集録、機器制御および表示を行なっている。図中の略語で示されている機能はつぎのごときものである。

STAR: 電話用ケーブルで 2 km 以上離れた所へ 70 K 語/秒の速度で 16 ビットの信号を並列に送る装置

DAS: アナログデータ収録システム。周波数分割のマルチプレクサーで 512 点指定。

CODD: ビームの軌道を測定するために検出電極からの信号をデジタル化し計算機で処理して表示する。

加速器のコンピューター制御はこのほかにも米国のアルゴンヌ国立研究所の ZGS、ローレンス放射線研究所のペバトロン、仏国オルセー研究所のコライディングマシン ACO 等でも種々の方式で実施されており¹³⁾ 前述の NAL では 2 台の中型計算機 Σ 2 に 8 台のミニコン (MAC-16) が接続され CAMAC システムにより各機器の制御を行なう方式が動き出している。

8. おわりに

以上高エネルギー実験におけるミニコンピューター利用の現状を代表的な例について簡単に紹介したが、今後この分野におけるコンピューター利用の範囲はま

すまず拡大してゆくであろうことは容易に想像できる。とくに基礎科学の分野の宿命として、つねに新しい装置や測定器が開発されるたびにまた用いるミニコンピュータの性能および信頼度に対する実験の要求も質・量ともに変革してゆくことが考えられる。その意味でわれわれ研究者とコンピュータ専門家、技術者との間に相互理解と実質的協力が今後ますます不可欠なものとなるであろう。

最後にこの稿を草するにあたり、種々貴重な資料を提供され、有益な助言をいただいた方々、とくに高エネルギー研亀井亨、高橋嘉右両氏、東大理山本祐靖、川口湊両氏、都立大山形武虎氏および東大核研鶴飼熊太郎、近藤敬比古両氏らに厚く感謝の意を表したい。

文 献

- 1) H.L. Anderson, E. Fermi, D.E. Nagle, and G.B. Yodh: *Phys. Rev.*, **86**, 793 (1952)
- 2) S.J. Lindenbaum: *Ann. Rev. of Nucl. Sci.*, **16**, 619 (1966)
- 3) ESONE Committee, "CAMAC, A Modular Instrumentation System for Data Handling." Eur 4100c
- 4) E. Bleser, et al.: *Nucl. Instr. Meth.*, **44**, 1 (1966)
- 5) T. Fujii, et al.: *Phys. Rev.*, **D2**, 439 (1970); S. Iwata: INS-J 115, 118, 119 (1970)
- 6) T. Fujii, et al.: *Phys. Rev. Lett.*, **28**, 1672 (1972)
- 7) H. Bradner: *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **10**, 109 (1960); 喜多 勲: 日本物理学会誌, 第 22 卷, 407 (1967)
- 8) A.H. Rosenfeld and W.E. Humphrey: *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **13**, 103 (1963)
- 9) Proceedings of 1966 Int. Conf. on Instrumentation for High Energy Physics, SLAC (1966)
- 10) M. Deutsch: Proceedings of Photon Conf. in the BeV-Ranges, VII-18 (1963)
- 11) 山形武虎, 清島達郎: SJC-T-66-2 (1966)
- 12) 亀井 亨: 応用物理, **41**, 274 (1972)
- 13) Proceedings of the 8th Int. Conf. on High Energy Accelerators, CERN (1971); *IEEE Transact. on Nucl. Science*, 16II (1969)