

I. Sato

National Laboratory for High Energy Physics

ABSTRACT

A new class accelerator for colliding beam are getting more and more attractive and affordable at high center-of-mass energies. This paper gives "How to build a future accelerator over 1 TeV."

はじめに 最近の高エネルギー物理は、電磁相互作用と弱い相互作用を統一的に説明するために不可欠であったゲージ粒子がCERNの270 GeV反陽子-陽子衝突リングを使った実験によって発見された話題で持ちきりである。これは、ワインバーグ・サラムによって既に予言されていた弱ボソン粒子 W^\pm と中性弱ボソン粒子 Z^0 である。この粒子の存在証明によって、物理現象の基本原理の一つであった空間の可移性が、超電導現象以外にも破れたことになった。又この粒子の発見によって、電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用の三者を統一的に説明する大統一理論の証明に一層の拍車がかかり、残されたゲージ粒子(グルオン)の発見、又は存在証明に高エネルギー物理学者はこの道を削り、我国も含めて国際競争は一層激しくなるであろう。

高エネルギー物理のマクロな経過は次の段階を一つの目安にしていると思われる。

1. 強い相互作用の粒子同士の衝突反応で衝突距離が素粒子の大きさ程度 (10^{-13} cm) の実験を主体としたもの。これに必要なエネルギーは GeV 領域である。このエネルギー領域では弱い相互作用の力は、電磁相互作用の力の約 10^3 程度であり、主体は強い相互作用をする粒子となる。この場合は、強い相互作用する新粒子の発見、粒子間の共鳴現象の解明等が主な目標となる。この領域は現在の高エネルギー加速器の活やく場である。
2. 強い相互作用の粒子同士の衝突距離が 10^{-16} cm (10^3 フェルミ) 程度に接近すると弱い相互作用と電磁相互作用がほぼ等しい力になる領域は、弱ボソン粒子を主体とした弱い相互作用の電磁相互作用のみの解明が出来ると思われる。これが可能なエネルギーは、約 100 GeV 程度である。この領域は現在のところ CERN の \bar{p} - p 衝突リングのみである。
3. 強い相互作用の粒子同士のエネルギーが更に上昇し、衝突距離が 10^{-29} cm 程度になると3つ相互作用の力がほぼ等しくなる状態が出現する。この状態になると全ての粒子が同等の扱いが出来るので、バリオン数やレプトン数の保存則も破れ、陽子が π 中間子と反電子ニュートリノや、 π 中間子と陽電子に崩壊する現象も生ずると考えられている。

これが実現出来る衝突粒子のエネルギーは、グルオン粒子の結合定数が電磁場の微細構造定数と等しくなるエネルギーと考えられているので、結合定数がエネルギーの対数に逆比例すると仮定すると、 10^{15} GeV と云う驚くべき値となる。この現象は最早や加速器で実証出来る領域ではない。これは、果報は寝て待ての諺の如く、陽子が崩壊

するのを気長く待つ方が利口である。

2と3との間は物理法則の大綱を作る視念に立てば全くの砂漠であると云う人も居るが、特に素粒子物理学は、新しい学説が古い学説を修正するが、又は覆返すことで発展して来た学問の在界であり、最近では高エネルギー加速器の進歩と共に進展している感がある。2の延長上ではあるが、最近TeV級の $e^+ - e^-$ の衝突型リニアコライターの必要性を強調する声が高まって来ている。いずれにしてもTeV級の高エネルギー粒子加速器を必要とすることは明らかであり、これらの加速器の建設を現在の加速器技術の延長上で考えると、地球規模の大きさとなり、その建設に又は維持に必要な費用は莫大なものとなる。これが今後の高エネルギー粒子加速器を建設する上で大きな壁になっている。例えば、1TeVの $e^+ - e^-$ の衝突リングの場合、回転する粒子のエネルギーと一周当りのシンクロトロン放射エネルギーが等しくなる臨界エネルギーに到達するリングの曲率半径は約88kmであり、地球を1周とするリングでも臨界エネルギーは約4.2TeVである。従って陽電子-電子衝突型のTeV級加速器は、直線加速器以外考えられない。特に直線加速器は加速電界強度を上げることによって長さの縮小を計ることが出来る。又衝突型加速器では、粒子の衝突確率は単位体積当りの各粒子数の積に比例するので、短パルスで大電流ビームを繰り返しを上げて加速する形式となるであろう。

将来の高エネルギー加速器 TeV級の高エネルギー粒子加速器へは色々な加速方法で接近が試みられている。それは、大出力パルスレーザー光の利用、大電流電子ビームのラマン散の利用、のえまに絞られて来たようであり、それを水について簡単に述べることにする。

[A] レーザー光の利用 レーザー光を加速器に利用しようとする最大の動機は、レーザー光に於ける目ざましい技術進歩によって、核融合を起すレベルに出力が増加したことにある。又、レーザーのパルス化や光増幅が自由自在に出来るようになっただけでなく、モードロック方式の採用によって安定度についても、電子回路並みになって来た事にある。例えばガラスレーザーでは、近い将来に数ピコ秒のパルス中で 10^{18} W/cm^2 の出力も可能になって来た。この光は平面電磁波であるから、電磁界の強さをそれぞれ E, H とすると、単位体積当りに含まれるエネルギー U は $U = \frac{1}{2}(\epsilon E^2 + \mu H^2)$ であり、光の横波の性質より $H/E = \sqrt{\epsilon/\mu}$ であるから、エネルギー流 P は、その速度を c とすると $P = Uc = \sqrt{\epsilon/\mu} E^2$ となる。真空中では $\sqrt{\mu/\epsilon} = 377 \Omega$ であるから電界強度は、 $1.94 \times 10^{10} \text{ V/cm}$ の驚異的な値となる。しかし、残念ながらレーザー光は横波であり、粒子加速が可能な縦波に変換する方法に色々なアイデアが考案されている。いずれにしても、他相も振動数も揃った単色光(コヒーレントな光)を、空間高調波の多い電磁波に変換して、光の電磁界を歪め粒子の進行方向に電界が生ずる様にすると同時に、電界の位相速度を粒子の速度に合わせることである。つまり光の電磁界が金属等の壁によって歪められるためには、光を波長程度の大きさの周期構造体に送り込むことであり、これは、線形加速器に於けるマイクロ波と加速管と同じ関係にある。光電磁波を光空洞で適度に減衰させ、電磁波の蓄積出来れば、数+GeV/m ~ 数百GeV/mの加速電界を発生する将来の加速器に発展する可能性もあり得る。

レーザー光の加速器への応用として提案されているのアイデアの大多数は、荷電粒子が物質

中、又は特定形状に金属の極く近傍を高速で通過したときの発光現象の逆過程を利用しようとするものであり、簡単に説明すると次の様になる。

[1] 逆チエンコフ効果の利用 光の屈折率 m であるガス中に加速粒子と $\theta = \cos^{-1}(1/m)$ なる角度でレーザー光を入射すると、期待される加速電界 E は、 $E \sim (R \frac{P}{\lambda} (1 - \frac{1}{m^2}))^{1/2}$ で表わされる。ここで R はガス中の波動インピーダンス、 λ はレーザー光の波長、 P はレーザー電力である。問題は、ガス中で荷電粒子を加速するため加速粒子のガスによる散乱や、加速電界は、レーザー光のガス中での放電による制限により 100 MeV/m が限界と与えられている。

[2] 逆自由電子レーザーの利用 磁極を交互にして周期長 λ_p の磁極を荷電粒子が高速度で単振動しながら通過するとき、荷電粒子の進行方向と角度 α で入射するレーザー光の電界をカップルして加速される。レーザー光の波長を λ 、周期磁場の強さを B とすると、加速電界 E は $U = \beta c \cos \alpha$ と $\lambda_p = \lambda (1 - \beta \cos \alpha)$ を満たすならば $E \sim (P^3 B^2 / \lambda)^{1/4}$ で与えられ、加速効率はいかにも悪いし、 β の変化に伴ってレーザー光の波長を変えるか、磁極の周期を変える必要性にせまられる。

[3] プラズマ加速 大出力のレーザー光をプラズマに加えるとレーザー光の輻射圧は数十気圧にもなる。この圧力はポンティアモレイヴカと呼ばれる非線形力場で複雑な機構で粒子と作用する。この力は、波の振動している電場 E と磁場 B による電子の運動を考えた時、電子に働くローレンツ力 $m \frac{dV}{dt} = e[E(r) + v \times B(r)]$ の第2項 $v \times B$ から生じ、 $f = -\frac{\omega_p^2}{\omega^2} \nabla \langle \frac{E^2}{8\pi} \rangle$ で表わされる。ここで ω_p と ω は、プラズマ角周波数と電子の角周波数である。即ち波が電磁波であると電子は E の方向に振動するが B が電子軌道を曲がらせ、ローレンツ力 $-e v \times B$ によって電子は波の進行方向に押し付けられ時間平均しても 0 にならない。つまり加速されたこととなる。

この外に波長の異なる2つのレーザー光をプラズマ中に入射し、2つの波の操動による非線形力を発生させ、この力で粒子を加速する前方ラーマン散乱による方法等が試みられている。

[4] グレーティングによる方法 これは、粒子の進行方向と直角な方向に周期的な溝がある金属板(グレーティング)に斜め入射したレーザーが溝に作る空間高調波で粒子加速をしようとする試みである。この方法は、スミエ、パーセル効果(荷電粒子を金属表面近くを走らせると金属の表面から光が放射される現象)の逆過程であり、空間高調波の一つの位相速度を粒子速度に一致させて加速する。以上の方法は未だアイデアの段階であり、粒子加速器として利用するには幾多の問題を解決する必要がある、それには、長い年月とねばり強い努力がいるものと思われる。

[B] ウェーク波による加速 この方法は、バンチした大電流のビームを加速空洞に直接に入射し、加速空洞中に強いウェーク波を発生させ、これを加速に利用する方法である。この方法は、大電流の加速ビームも加速可能であり、加速電界も強いので、次の世代の高エネルギー加速器として魅力を感じさせるものがある。又、これは現在の加速器技術の延長上にあるので実現の可能性も充分あると思われる。

ここでは将来の加速器に関連する加速原理に関する一部を述べたにすぎない。その他、レーザー光の加速器への側面からの中広い利用方法も考えるべきである。