ニュートリノはどこに？(10 点)

２個の陽子が大型ハドロン衝突型加速器（LHC）で衝突すると，電子，ミューオン，ニュートリノ，クォークやそれらの反粒子などの粒子が生成される。これらの粒子のほとんどは衝突点を取り囲む粒子検出器で検出できる。例えば，クォークはハドロン化という過程で原子よりも小さい粒子のシャワー（ジェット：Jet と呼ばれる）になる。さらに，検出器内の強い磁場により，エネルギーが非常に大きい荷電粒子であっても軌道を曲げることができ，その運動量が決定できる。ATLAS 検出器は，超伝導ソレノイド系を用いて，衝突点を取り囲む検出器内部に一定かつ均一な 2.00 テスラの磁場を作っている。ある値以下の運動量をもつ荷電粒子は強く曲げられるために，磁場中を何回も回転し，ほとんど検出されない。また，ニュートリノはその性質から，相互作用せずに検出器を通り抜け，全く検出されない。

データ：電子の静止質量 $m = 9.11 \times 10^{-31}$ kg，素電荷 $e = 1.60 \times 10^{-19}$ C，

光速 $c = 3.00 \times 10^{8}$ m s^{-1}，真空の誘電率 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F m^{-1}

Part A. ATLAS 検出器の物理（4.0 点）

A.1	電子は磁場から速度に垂直な方向に力を受け，円運動を行う。そのサイクロトロン半径 r の表式を，運動エネルギー K，電荷の絶対値 e，質量 m，磁場 B によって表わせ。電子は非相対論な古典粒子と仮定する。	0.5pt

ATLAS 検出器内部で生成される電子は相対論的に扱わなければばならない。

A.2	検出器の内部を半径方向に抜け出す電子の運動量の最小値を計算せよ。検出器の内部は半径が 1.1 メートルの円柱状で，電子は円柱のちょうど中心の衝突点で生成される。答えは MeV/c の単位で表わせ。	0.5pt

電荷 e，静止質量 m を持つ相対論的粒子が速度に垂直に加速されると，シンクロトロン放射と呼ばれる電磁波が放射される。単位時間あたりに放射されるエネルギーは，

$$P = \frac{e^2 a^2 \gamma^4}{6\pi\epsilon_0 c^3}$$

ここで a は加速度，$\gamma = [1-(v/c)^2]^{-1/2}$ である。

A.3	超相対論的粒子では，単位時間あたりに放射されるエネルギーは次のように表される。 $$P = \xi \frac{e^4}{\epsilon_0 m^k c^n} E^2 B^2 ,$$ ここで，ξ は実数，n, k は自然数，E は荷電粒子のエネルギー，B は磁場である。ξ，n，k の数値を求めよ。	1.0pt

A.4	超相対論的極限において，電子のエネルギーは時刻の関数として次のようになる。 $$E(t) = \frac{E_0}{1 + \alpha E_0 t} ,$$ ここで，E_0 は電子の初期エネルギーである。α を e，c，B，ϵ_0，m の関数として求めよ。	1.0pt

A.5	100 GeV のエネルギーを持つ電子が衝突点で生成され，半径方向に進むとする。その電子が検出器の内部を抜けるまでにシンクロトロン放射により失うエネルギーの数値を見積もれ。答えは MeV の単位で表わせ。	0.5pt

A.6	超相対論的極限で，電子のサイクロトロン周波数を時刻の関数として表わせ。	0.5pt

Part B. ニュートリノを探す（6.0 点）

図１のように，２個の陽子が衝突すると，最も重い素粒子であるトップクォーク (t) と反トップクォーク ($\bar{t}$) が生成される。トップクォークは W^+ ボソンとボトムクォーク (b) に崩壊し，反トップクォークは W^- ボソンと反ボトムクォーク ($\bar{b}$) に崩壊する。図１に示されるケースでは，W^+ ボソンは反ミューオン (μ^+) とニュートリノ (ν) に崩壊し，W^- ボソンはクォークと反クォークに崩壊する。この問題の課題は，検出された複数の粒子の運動量を使って完全なニュートリノの運動量を再現することである。**簡単のため，この問題で考える粒子とジェットは，トップクォークと $W^\pm$ ボソンを除いて全て質量がないと考える。**

トップクォークが崩壊してできる生成物の運動量は，ニュートリノの運動量の z 成分を除いて実験から決定できる（表を見よ）。終状態の粒子の全運動量は，横平面（xy 平面）の成分だけがゼロで，衝突軸（z 軸）成分はゼロでない。そのため，横平面の欠けた運動量からニュートリノの横運動量を求められる。

2015 年 6 月 4 日の 00:21:24 (GMT+1) に，LHC の ATLAS 実験で図１に示されるような陽子-陽子衝突が記録された。

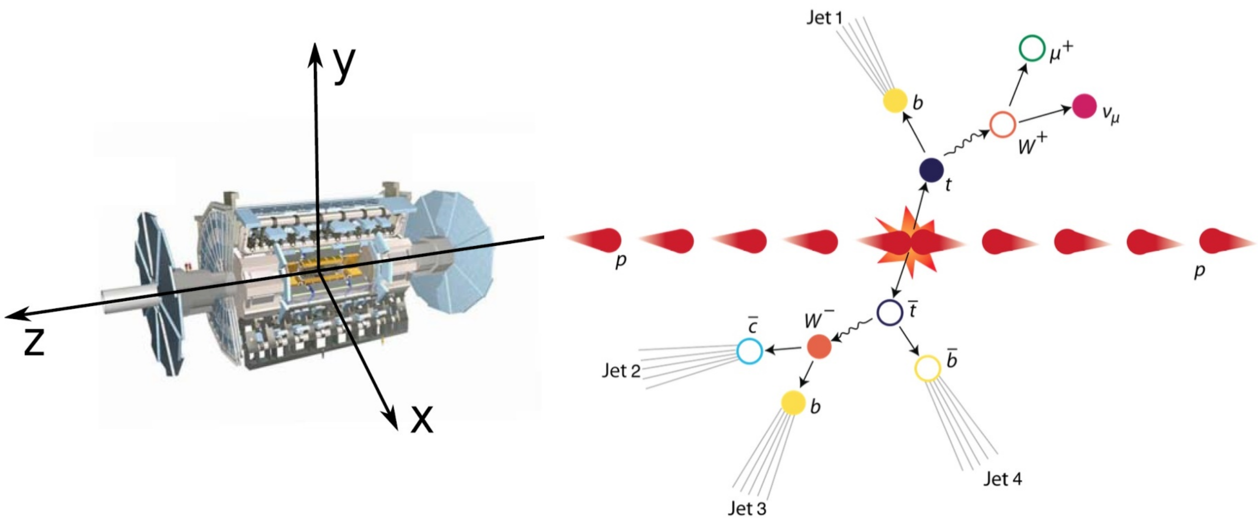

図１．ATLAS 検出器の座標系の模式図（左）と陽子-陽子衝突の模式図（右）

トップクォークが崩壊した終状態の３個の粒子（ニュートリノを含む）の運動量が成分ごとに示されている。

粒子	p_x (GeV/c)	p_y (GeV/c)	p_z (GeV/c)
反ミューオン (μ^+)	-24.7	-24.9	-12.4
Jet 1 (j_1)	-14.2	$+50.1$	$+94.1$
ニュートリノ (ν)	-104.1	$+5.3$	—

B.1 W^+ ボソンの質量の２乗 m_{W}^2 と，上の表に示されているニュートリノと反ミューオンの運動量の成分の関係式を求めよ。解答を 1.5pt

$$\vec{p}_{\mathrm{T}}^{(\nu)} = p_x^{(\nu)}\,\hat{x} + p_y^{(\nu)}\,\hat{y}\ ,\ \ \vec{p}_{\mathrm{T}}^{(\mu)} = p_x^{(\mu)}\,\hat{x} + p_y^{(\mu)}\,\hat{y},$$

で定義されるニュートリノと反ミューオンの横運動量と，運動量の z 成分 $p_z^{(\nu)}$, $p_z^{(\mu)}$ を用いて表わせ。

B.2 W^+ ボソンの質量を $m_{\mathrm{W}} = 80.4$ GeV/c^2 と仮定して，ニュートリノの運動量の z 成分 $p_z^{(\nu)}$ の２つの解を数値的に求めよ。答えは GeV/c の単位で表わせ。 1.5pt

B.3 前問の２つの解それぞれについて，トップクォークの質量を数値的に求めよ。答えは GeV/c^2 の単位で表わせ。 1.0pt
[もし B.2 で２つの解を得られなかったときは，次の値を用いよ。

$$p_z^{(\nu)} = 70\ \text{GeV}/c\quad ,\quad p_z^{(\nu)} = -180\ \text{GeV}/c\,]$$

トップクォークの質量測定で必要となる衝突イベントの相対度数は２つの要素からなる：シグナルと呼ばれる要素（トップクォークの崩壊に対応する）とバックグラウンドと呼ばれる要素（トップクォークを含まない他の過程のイベントに対応する）である。実験データにはこれら両方の過程が含まれる。図２を見よ。

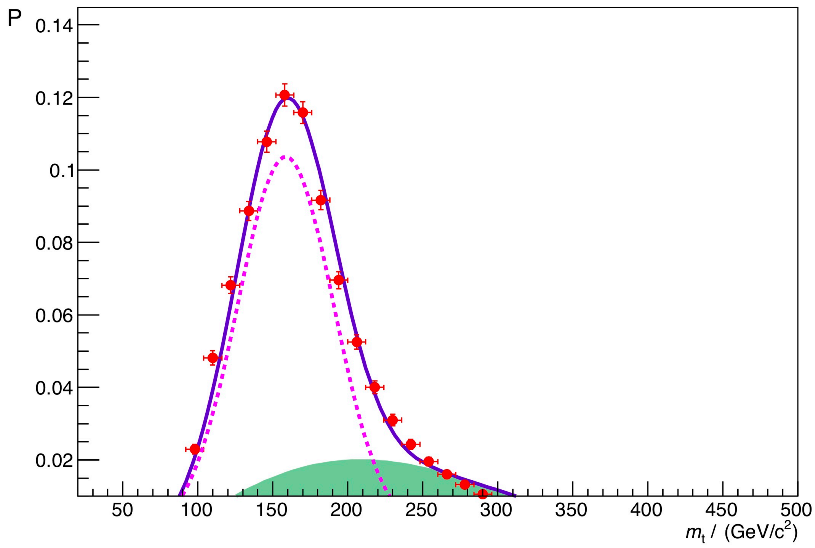

図２．実験から決定されるトップクォークの質量分布（イベントの相対度数）がトップクォークの質量に対してプロットされている。点はデータに対応する。破線は「シグナル」，色のついた部分は「バックグラウンド」にそれぞれ対応する。

B.4	トップクォークの質量分布に基づくと，前に求めた２つの解のうちどちらがより正しいであろうか。最も可能性の高い解について確率を見積もれ。	1.0pt

B.5	トップクォークが崩壊するまでに進む距離を，最も可能性の高い解を用いて数値的に求めよ。トップクォークは静止系で 5×10^{-25} s の平均寿命を持つと仮定する。	1.0pt