

S-H17-82

キセノンを利用した新しい3次元検出器の 最適設計とその応用に関する調査研究

早稲田大学 鈴木 聡

本調査研究期間中、光電子増倍管を内蔵した液体-気体2相型キセノン3次元テスト検出器を製作し、その動作テストを行うと同時に、コンピューターシミュレーションによる性能評価を行った。また、液体キセノンを実際に応用した検出器として、タイム・オブ・フライト型陽電子断層画像装置用検出器装置（TOF-PET装置）に関して、それぞれ32本の光電子増倍管を内蔵した2台のテスト検出器の実験結果をまとめ、その結果に基づいたコンピューターシミュレーションを行い、液体キセノンシンチレーションTOF-PET装置の可能性ならびに検出器の最適化デザインに関する検討を行なった。

3次元テスト検出器の製作とテスト結果

*光電子増倍管（Hamamastu R5900-06）の液体キセノン中での動作テスト

テスト検出器に使用する29本の光電子増倍管を室温で2.5気圧のキセノンガス中に配置し、 ^{241}Am からの α 線によるキセノンガスからの励起光に対する各光電子増倍管の量子効率とGainの温度による変化を観測した。キセノンガスをゆっくりと冷却し(5°C/hour)、室温(20°C)から液体キセノン温度の-100°Cまで冷却し、その後再び、室温までゆっくりと上昇させ10°C毎の測定を行った。その結果、各光電子増倍管ごとにばらつきはあるが、平均すると液体キセノン温度では量子効率が約20%、Gainも10%程度、室温に比べて良くなることが分かった。

*循環型純化装置のテスト

液体キセノン検出器を安定にかつ効果的に利用するには、真空紫外領域にある液体キセノンのシンチレーション光がキセノン中の不純物の吸収により減衰したり、電離電子が電気的に陰性不純物による電子付着で損失したりしないように細心の注意を払ったガスの純化・保存技術が要求される。一般に、液体キセノン中の不純物濃度はppbあるいはそれ以下のレベルまで下げる必要がある。本テスト検出器のように多数の光電子増倍管を検出器内部に取り付けた場合、液体キセノンを検出器内に注入する前に、真空焼き出しによる検出器内部のクリーニングを十分な高温で行うことができなくなる。その結果、水、二酸化炭素、炭化水素等の残留不純物による発光光量の劣化や不安定性が起きてしまう可能性がある。本調査研究では検出器が作動中でも連続的にキセノン蒸気を純化し再び液化して検出器に戻す循環型の純化装置のテストを行った。キセノンの循環にはダイヤフラムポ

ンプを用い、1分間に約15リッターの速度でキセノンガスの純化を行った結果、1.5リッターの液体キセノンをはぼ1日で完全に純化することに成功した。

*3次元テスト検出器の製作

テスト検出器は既存の冷却装置が使用でき、しかも容易に繰り返し実験ができるように小型化を図り、直径を25cm、液相部の深さは3~5cmと可変式にした。光電子増倍管も既存の1インチ角型のものを縦、横5列ずつ置き、さらに中心線上の上下左右に各々1個ずつ、合計29個使用し、検出器内部の陽極上部3cmの距離をおいて同一平面上に電子回路を含め取り付け付けた。このテスト検出器を既存の純化装置ならびに上記した循環式純化装置に組み込んだ。

*実験結果

コリメートした γ 線を検出器の外から照射し、 γ 線とキセノンが反応した点の位置を比例蛍光の光量重心をイベント毎に出し、その分布より陽極線面上(x, y 平面上)での位置分解能を導出した。 γ 線源はコンプトン散乱により画像がぼやけなくなるべくエネルギーの低い線源、 ^{57}Co (122 keV γ 線)をテスト検出器の底部から3mmのコリメーターを通して照射した。その結果、ワイヤー方向に対して1.6mm、ワイヤーに垂直方向に対しては2.8mmが得られた。実験とは別に陽極線面上に1mmの幅を持ったGauss分布した光源を仮定した簡単なコンピューターシミュレーションを行った結果、 10^5 個以上の光源(122keV γ 線の場合電離電子1個につき光子10個程度生成することに相当する)があれば1mm以下の位置分解能が得られることが分かった。実験結果がシミュレーションの結果より悪いことに関しては、キセノン中での122 keV γ 線の反応の大部分は光電効果であるが約10%程度のコンプトン散乱が含まれていること、陽極ワイヤー近傍での電気力線の曲がりの影響、低温下での光電子増倍管の調整が不十分であったことなどがあげられる。また、エネルギー分解能に関しても、十分に良い結果が得られなかった。それは循環式純化装置に使用したダイヤフラムポンプがパルスで駆動するため、液面が波打って検出器の応答が安定しなくなる(ガス中で生成される比例蛍光が不安定になる)ためと考えられる。この問題を解決するため、冷凍機と重力だけを利用して、連続運転が可能な新しい循環式純化装置を考案し、試作することを計画している。

液体キセノン検出器のPETへの利用に関する研究調査

液体キセノンは他のシンチレーターと比較して発光量(NaI結晶と同程度)が多いため、良いエネルギー分解能ならびに位置分解能が期待できる。それに加え、 γ 線に対する発光の減衰時間が45ナノ秒と非常に速いため、計数率が高く、優れた時間分解能を持った検出

器が製作可能である。我々はこのような観点から、液体キセノンを利用した TOF-PET 装置の開発を目指した基礎研究を行ってきた。本研究課題では、これまでに得られた 1 対の試作検出器による実験結果をまとめた。それによると、以下の様な優れた性能を持つことが分かった。

- ・ 視野中心で 3.3 mm の空間分解能を持つ。これは全身用 PET 装置としては十分な分解能である。
- ・ 平均 300 ピコ秒の時間分解能を持つため TOF-PET 装置としての利用が可能である。その際の再構成画像の S/N 比は 3.2 倍改善される。
- ・ 信号同期のタイミングに対する分解能は 552 ピコ秒である。これにより信号同期のウィンドウの幅を短くすることができ、偶発同時計数のイベント数を減らすことができる。
- ・ 有効領域内で平均 20.5 % のエネルギー分解能を持つ。これは PET 検出器として十分なエネルギー分解能である。
- ・ 液体シンチレーターであるため均質に大型化することができ、高い検出感度が得られる。しかも、検出器の深さ方向の位置も計算することができるので、視野領域外側での位置分解能の劣化を抑えることが可能である。
- ・ 液体キセノンのシンチレーション光の減衰時間は非常に短いため高い計数率特性を得ることができる。

そこで、液体キセノンシンチレーション TOF-PET 装置の可能性ならびに検出器の最適化デザインを検討するために、試作検出器で得られた結果に基づいたコンピューターシミュレーションを行った。ドーナツ型の内径 80 cm、液体キセノン部の厚さを 6 cm、軸方向の長さをパラメーターとしてシミュレーションを行った結果、軸方向の長さが長いほど検出感度が良くなるが位置分解能が劣化することが分かった。人体の患部の大きさを考慮した場合、位置分解能は 5 mm 以下であれば十分と考えることから軸方向の長さを 24 cm が最適であると決定した。このシミュレーションは普通の画像処理だけを想定して行ったが、既存の装置と比較して、十分に優れた性能であると言える。これに TOF の特性を加えることにより、これまでにない診断速度を持ちしかも十分な位置分解能を持つ PET 装置の実現が可能であると結論することができた。