

Edwin P.Hubble Space Telescope의 構造와 觀測裝置

趙慶哲

(1987년 1월 20일 받음)

Structure and Observational Equipments of Edwin P.Hubble Space Telescope

Kyong Chol Chou

(Received Jan. 20, 1987).

世界第2次大戰이 끝난 以後로부터 40餘年間, 現代 觀測天文學을 이끌어 온 Palomar 山の 500 cm 反射望遠鏡은 드디어 次世代望遠鏡에게 leadership을 넘겨 주게 되었다. 資金檢出이 如意치 않아 그 동안 不振했던 超大型望遠鏡 建設이 드디어 boom을 일으키게 된 것이다.

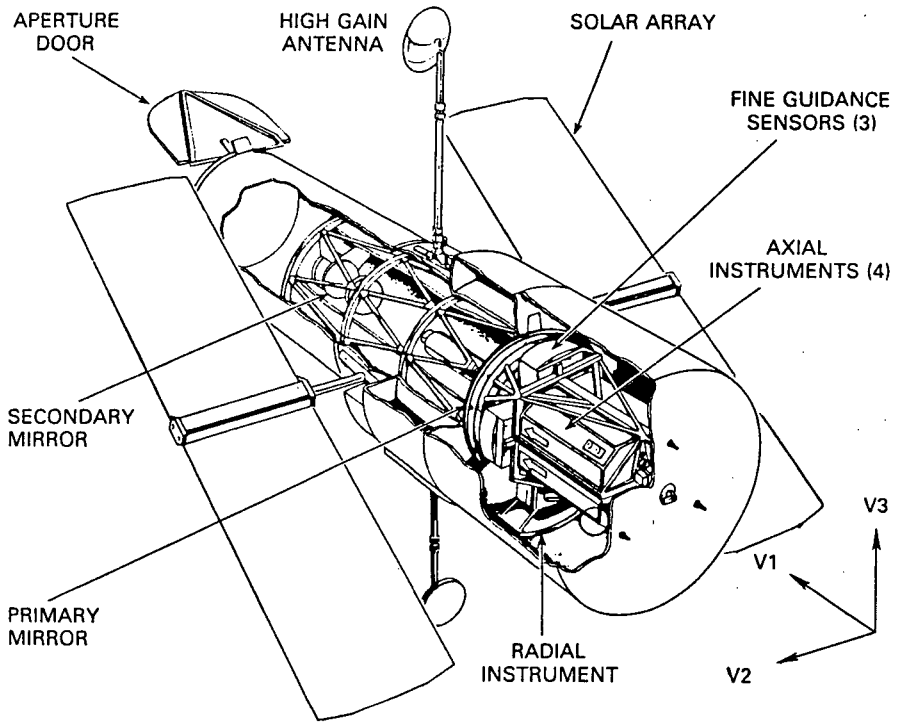
加州工科大學의 10 m 反射望遠鏡이 製作 中에 있고, Ohio州立大學도 10 m 雙筒反射望遠鏡 建立을 推進 中에 있고, 日本도 7.5m 反射望遠鏡 建立을 檢討 中이다.

韓國은 1.5~2 m 反射望遠鏡 製作이 具體化되어가고 있으니, 1970年, 不過 40 cm 反射鏡 1臺만 갖고 孤軍奮鬪하던 그 때를 超起하면 實로 感慨無量하다 아니 할 수가 없다.

그러나 NASA는 또 한편, 次世代望遠鏡으로서 Space Shuttle을 利用하여 衛星望遠鏡을 發射할 計劃을 1965年에서부터 構想하여 數次에 걸친 發議·否決을 거듭한 끝에, 드디어 1977年, 美國會의 建造認准을 얻었다.

I. Space Telescope의 製作

이 衛星望遠鏡은 Space Telescope라 부르기로 하였다. Space Shuttle의 運搬能力을 考慮하여 그 크기를 直徑 94 inch(2.39 m)로 定했다. 樣式은 Cassegrain 型式을 採擇하기로 하였고 副鏡의 크기를 12.5 inch(32 cm)로 設計했다.



Edwin P. Hubble Space Telescope의 構造

놀라운 사실은 Palomar의 5m 反射鏡은 그 크기대로 세계에서 最強의 集光力을 誇示해 왔지만 地球大氣圈의 減光效果로 이 Space Telescope는 크기는 1/2도 안되지만 反對로 集光能力에 있어선 50배나 된다는 點이다. 分解能은 1/10 秒角이다.

이 望遠鏡 製作은 美國 Connecticut 州에 있는 有名한 Perkin-Elmer 社에게 作賴했다. 主鏡 材料는 Corning Glass 社에 發注했다. 要求條件은 實內溫度에 있어서는 zero expansion 이어야 하는 것, 그리고 總重量은 1,000 kg 以內여야 하는 것, 그래서 이른바 ULE glass를 開發하여 벌(蜂)집 模樣의 構造(honeycomb structure)를 가진 2.54 cm의 板유리로 mirror 形態를 갖추게 했다. 完成된 原形은 直徑 239cm, 두께 25cm인 honeycomb 圓盤이 된 것이다. 무게는 1 噸, 價格은 75 萬弗, Palomar의 500 cm 鏡의 무게가 14 噸인 것에 比하면 엄청난 節約·輕量化를 시킨 셈이다.

이것을 Perkin-Elmer에서 다음 段階로서 研磨作業에 들어가야 했는데 表面精度의 NASA側 specification은 $1/65 \lambda$ (宇宙空間에서 使用時!)였다. 이것은 前代未聞의 要求條件이 아닐 수가 없었다. 地上望遠鏡 mirror의 경우 $1/20 \lambda$ 의 精度를 가진 表面이면 完璧(perfect) 하다고

하는데, 中型級 一流 maker 가 만든 鏡面이라 해도 $1/10 \lambda$ 면 最上이다라고 하며 大型級(150 cm 以上)에 있어선 鏡面に 作用되는 重力效果까지 考慮하여 1λ 면 workable condition 이라 할 程度며 事實上 그렇게 되어 있는 現狀인 것이다.

또 하나의 製作問題가 있었다. 이 Space Telescope 은 無重力狀態에서 稼動하게 되었다는 點이다. 地上에서 제 아무리 精密하게 研磨한 것이라 해도 그것은 地球重力의 影響下에서 만들어지는 것이니까 mirror 를 水平으로 1 屯 무게의 239 cm 짜리가 놓여지면 中心部가 밑으로 17 λ 만큼 내려 앉는다. 그런데 이것이 宇宙空間에선 無重力狀態가 되어 反對로 17 λ 만큼 復元하는 方向으로 휘어지니까 $1/65 \lambda$ 精度로 地上에서 研磨했다는 것은 아무런 意味도 갖지 못한다는 結果가 되어버린다.

그래서 Perkin-Elmer 는 큰 chamber 를 만들어 이 mirror 를 無重力狀態에 놓기로 했다. 勿論 그대로는 물 속에 넣어도 無重力狀態는 되지 않으니 mirror 各部分에 作用하는 地球重力量을 computer 로 計算하여 138 個의 棒으로, 固定시킨 mirror 를 後面서부터 그 該當重力의 힘 만큼 全面을 밀어 받치기로 하였다. 다시 말해, mirror 中心部는 위로 17 λ 만큼 凸形이 된 셈이다.

이렇게 만들기 爲해 50 名의 技術者가 動員되었다. 無重力狀態서 받을 旣 效果도 除去하여야 했다. Counter weights 의 pivot 로 因한 friction, 또한 이 counter weights 를 setting 할 때의 誤差 때문에 mirror 面엔 distortion 이 생긴다. 이러한 골치 아픈 일들을 그들은 $1/300 \lambda$ 의 精度까지 具現시켰다.

研磨作業은 普通 大型 mirror 의 경우는, 部分研磨를 機械로 하고 다시 綜合研磨로 끝내고, 最後 finishing 을 hand polishing 으로 매듭짓는 것이 普通인데, 이 mirror 는 computer 로 調整하면서 約 10 cm 直徑의 部分円形研磨를 單位로, 繼續이어 나가는 式을 擇하였다. 25 回 반 復研磨가 끝났을 때는 鏡面은 $1/90 \lambda$ 精度로 完成시킬 수가 있었다. 그 때가 1981 年 5 月이었다.

副鏡의 面은 크기가 작아서 큰 어려움 없이 $1/100 \lambda$ 의 精度의 것이 完成되었다.

다음 段階는 主鏡의 coating 이다. Coating team 은 1977 年 11 月에 構成되었다. NASA 의 要求條件은 coating 한 鏡面은 可視光線은 85 %, UV 는 70 % 反射시켜야 되고 그 coating 의 均一性은 全 鏡面을 通해 coating 膜層誤差를 3 % 以下로 維持하여야 하며 aluminium coating 膜層의 두께는 0.0000635 mm 여야 한다는 것이다. 그 위를 aluminium 表面의 酸化를 防止하기 爲하여 0.0000254 mm 의 弗化 magnesium 으로 coating 하여야 했다.

그러나 3 % 以下여야만 된다는 uniformity error 의 要求는 너무도 困難하고 費用面에서도 큰 負擔이 되기 때문에 10 % 로 내릴 것이 提案되었지만 1978 年 3 月, NASA 는 從前대로의 要求를 固守하기로 했다. 天文學者들의 意見이, 10 % 로 낮추기 때문에 잃어버릴 光子數가 돈을 더 投入한다는 것보다 더욱 걱정이 되기 때문이라는 理由에서였다.

Coating은 1秒當 0.0000254 mm式 aluminium膜이 鏡面에 附着되도록 하여야 했고, 3%의 uniformity error 以下로 내리기 爲해선 coating하는 동안 mirror를 廻轉시키면서 하여야 했다. 1981年 12月 5日, coating 直前에 脱ion化된 蒸溜水 2,400 gallon을 퍼 부어 洗面하고 서서히 170°C까지 加熱시킨 다음 鏡面의 모든 有機物을 除去하고 난 뒤, 15名의 技術者들은 computer의 도움으로 4個의 aluminium beam gun에다가 48,000 watts의 壓力을 걸었다. 眞空 chamber 속의 mirror는 3秒間 aluminium beam gun의 集中射惠을 받은 後, 68秒 동안 그냥 두었다가 이번엔 弗化 magnesium gun의 砲門이 1秒間 열렸다. 電氣 switch를 넣는 瞬間부터 메는 데까지 不過 4分밖에 걸리지 않았던 coating 作業이었지만 이 準備를 爲하여 4年間이란 歲月을 努力 研究해 왔던 것이었다. 結果는 大成功이었다.

UV 反射能은 要求條件 70%보다 더 높은 78%를 얻었으니 말이다.

다음 作業은 鏡筒의 truss 製作問題였다. 이 製作은 Boing Aircraft 社에게 發注했다. 얼핏 生覺하기엔 無重力空間에 날릴 것이니까 構造上 堅固할 必要는 없겠지 하겠지만 事實은 그 反對였다.

이것을 Space Shuttle에 실어 發射時, 3G로 加速되는 까닭에 큰 負擔을 받는다는 것과, rocket engine이 엄청난 推力을 내기 爲해 噴射하는 過程에서 宏壯한 振動現象을 일으키는 데 그 影響을 받게 되기 때문이다.

그 뿐만 아니다. Space Telescope는 地球周圍의 宇宙空間을 100分에 도는 軌道運動期間中 地球上에선 經驗못할 +100°C~ -110°C라는 溫度變化를 爲하여야 한다. 다시 말해 이 溫度變化에 따르는 鏡筒構造物 全體가 이 期間中 伸縮하여야 하니 望遠鏡의 焦點이 一定하게 잡힐 수가 없다. 그래서 truss 製作에 使用되는 新素材開發에 머리를 써야했다. 採擇된 材料는 graphite-fiber-reinforced epoxy, 卽 簡單히 말해서 黑鉛 epoxy란 것을 開發한 것이었다.

이 材料는 +100°C~ -110°C란 激烈한 變化 中에서도 不過 0.00289 mm밖에 伸縮하질 않는다! 무게도 가볍다. Space Telescope의 鏡筒의 크기는 길이가 533 cm 直徑이 292 cm이다. 그런데 總 무게는 單 114.3 kg밖에 되질 않는다! Palomar의 5 m 望遠鏡의 鏡筒 무게는 120 屯이나 되니까 이것과 比較하면 1/1000도 안 된다는 이야기이다.

이것은 1980年 겨울에 納品되었다. 그러나 이 Space Telescope의 光軸變化는 0.0000102 mm 以下여야 한다는 NASA의 要求條件이다. 제 아무리 優秀한 新素材라 해도 0.00289 mm의 收縮·膨脹은 하게 되니까 0.0000102 mm의 條件을 滿足시키려면 또 다른 處置가 必要케 된다.

그래서 truss 上部에 6個의 motor가 달린 加動裝置(actuator)를 附着시켜 Space Telescope이 軌道에 올랐을 때 1個月間 焦點距離를 맞추어 놓기 爲한 作業을 數次에 걸쳐 할 것이다. 그 後에도 必要에 따라 使用할 수 있게 되 있다.

黑鉛 epoxy는 吸水作用도 한다. 宇宙空間은 濕度가 50% 以下지만 全體 truss 構造는 地球上에선 約 500 g의 水分을 吸收하고 있다. 그래서 이것이 軌道에 오르면 첫달 동안에 이 水分이 蒸發함에 따라 0.196 mm의 鏡筒 길이의 收縮變化가 생긴다. 그리고 또 地球重力圈을 벗어나면

서若干膨脹한다. 이러한 複雜한 鏡筒의 伸縮變化量은 技術陳이 理論的으로 計算한 것과 實際로 Space Telescope 가 軌道에 올랐을 때에 생기는 結果와 생기는 差는 actuator 가 能히 調整할 수 있을 것으로 본다.

이 程度면 焦點 맞추기엔 充分한 對策을 세웠다고 보지만 이것으로도 完璧하다고 生覺치 않고, mirror 와 truss 를 恒常 宇宙空間의 溫度變化에도 不拘하고($100^{\circ}\text{C} \sim -110^{\circ}\text{C}$), $28^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 維持하기 爲해 성냥갑 크기의 加熱器를 mirror 뒷면과 truss 各部分에 700 個를 만들어 分布 附着시켜 놓았다.

이 Space Telescope 의 主要한 技術的인 業績은 地上管制所로부터 遠隔調整方法으로 軌道上의 望遠鏡 焦點 및 光軸의 修正이 可能하게 되었다는 點이다.

이러한 方法은 望遠鏡焦點面에 裝置한 3 個의 interferometer 로 地上에 電波通信方法으로 行하게 되 있다.

또 하나의 巧妙한 裝置는 主鏡面의 表面調整裝置이다. 無重力狀態에 놓인 mirror 는 計算대로 17 λ 만큼 中心部가 復元되고 그 周邊도 比例的으로 復元된다고도 保障할 수 없기 때문에 이 mirror 뒷면에 24 個의 棒끝에 aluminium板이 附着된 것이 分布 裝置되 있다. 이것으로 1 λ 만큼의 範圍까지 修正可能하다.

이렇게 2重 3重의 補完裝置가 具備된 것을 製作하는 데는 普通努力과 時間이 必要한 것이 아니었다. 이러한 複雜한 過程을 거쳐 드디어 1984年 10月 29日, Perkin-Elmer社는 이 Space Telescope 를 完成시켰다.

NASA는 이 望遠鏡을 銀河研究의 開拓者요 오늘날 거의 定立된 Big Bang說의 基礎를 提供한, 美國이 낳은 가장 偉大한 天文學者의 한 사람인 Edwin Powell Hubble(1889 ~ 1953)의 業績을 記念하기 爲해 Hubble Space Telescope(HST)라 命名하기로 決定했다. HST는 1986年 8月 18日에 Space Shuttle 로 發射할 計劃이었던 것이 年初에 發生했던 Challenger 號의 爆發事故로 그만 延期되고 말았다. 尙속에, 이 HST의 發射豫定日은 決定이 안 되고 있다.

HST를 만드는 데는 7年間の 製作日과 400萬 時間이란 延作業時間과 12億弗이란 莫大한 金額이 投入되었고, 이 額數는 現存하는 가장 큰 40臺의 天體望遠鏡의 總建造費에 該當하는 것임을 附記해 둔다.

II. Hubble Space Telescope 의 觀測裝置

HST엔 6 種類의 觀測裝置가 裝備되 있으며 그 內譯은 다음과 같다.

1. 廣角 및 行星 Camera(WF/PC)
2. 微光天體 Camera(FOC)
3. 微光天體分光器(FOS)

4. 高分解能分光器(HRS)
5. 高速測光器(HSP)
6. 精密追尾感知器(FGS)

여기에 각 장치에 대해 詳細하게 說明해 두기로 한다.

a) 廣角 및 行星 Camera(WF/PC)

WF/PC는 唯一한 HST의 光軸上에 놓여 있는 裝置이며, 廣角이지만 回折效果가 없는 高性能 digital image를 갖고 있다. 이것은 4개의 CCD가 image 處理를 담당한다. 각 CCD는 800×800 素點으로 되어 있으며 그 感度波域은 $1,150 \sim 11,000 \text{ \AA}$ 이다. 廣角 camera(低分解能)는 $0''.10$ 角의 크기를 가진 素點으로 된 $2'.6 \times 2'.6$ 視野를 갖고 있으며, 行星 camera(高分解能)는 $0''.043$ 角 크기의 素點으로 된 $1'.1 \times 1'.1$ 視野를 cover 한다. Filter도 使用 可能하고 grating 과 polarizer를 넣어 slitless 分光觀測과 偏光觀測도 할 수 있게 되어 있다.

이 system으로는 1時間 露出로 28等級의 별 檢索이 可能하기 때문에 Palomar의 5m反射 望遠鏡보다 50倍나 強力하다고 할 수가 있는 것이다.

b) 微光天體 Camera(FOC)

FOC는 이 HST의 光學的 能力을 最大限으로 動員하기 爲해 작은 視野의 高分解能像을 얻는데 그 目的이 있다.

FOC는 3種類의 focal ratio($f/48$, $f/96$, $f/288$)를 使用하게 되어 있다.

여기에도 역시 filter, grating 및 polarizer들이 光路에 搜入될 수 있게 되어 있다.

$f/48$ camera는 512×512 素點面으로 構成되어 있으며 field의 크기는 $22'' \times 22''$, 素點 크기는 $0''.043 \times 0''.043$ 것이 標準으로 使用되지만, 必要에 따라 field, $44'' \times 44''$, 素點面 $512 \times 1,024$ 및 素點 크기 $0''.086 \times 0''.043$ 으로도 使用 可能하다.

$f/96$ camera는 標準型은 $11'' \times 11''$ FOV(field of view), 512×512 素點面, $0''.022 \times 0''.022$ 素點 크기, 變型으로는 $22'' \times 22''$ FOV, $512 \times 1,024$ 素點面 및 $0''.044 \times 0''.022$ 素點 크기로 使用될 수가 있다. 이것은 다시 $3'.7 \times 3'.7$ FOV, 512×512 素點面 및 $0''.0072$ 素點 크기로도 變形시킬 수가 있는데 $f/96$ camera에다가 $f/288$ reimager를 搜入함으로써 可能해진다.

c) 微光天體分光器 (FOS)

FOS는 $1,150 \sim 8,500 \text{ \AA}$ 波域에 걸쳐 微光天體에 對한 低分解能($R \simeq 250$) 부터 高分解能($R \simeq 1,300$) 分光觀測을 할 수가 있다. 線形 및 円形偏光分光觀測도 할 수가 있다. 低分解能分光器엔 2個의 grating과 하나의 prism, 高分解能分光器엔 6個의 grating이 設置되어 全波域을 cover 하게 되어 있다. 여기에 2個의 detector가 있어 各己 512個 要素로 되어 있는 Digicon의 하나는 $1,150 \sim 5,500 \text{ \AA}$ (靑色)을, 또 하나의 Digicon은 $1,800 \sim 8,500 \text{ \AA}$ (赤色)을 담당한다.

分光 data를 readout 하는데 있어선 蓄積, 速讀 및 周期的 mode가 可能하며 time resolution은 20ms 까지 可能하다. 그리고 FOS는 分光觀測 可能限度가 1時間에 眼視等級 22(高分解能) 및 26(低分解能) 까지 到達할 수가 있다.

d) 高分解能分光器 (HRS)

HRS system은, $1,150 \sim 3,200 \text{ \AA}$ 波域에 있어서 低, 中間 및 高分解能($R=2,000, 20,000, 100,000$) 分光觀測을 할 수가 있다.

이것도 역시 上述한 것과 같은 2個의 Digicon을 檢出器로 使用한다. 하나는 $1,050 \sim 1,700 \text{ \AA}$, 또 하나는 $1,150 \sim 3,200 \text{ \AA}$ 波域을 cover 한다. 1回 露出當 cover 할 수 있는 波長은 高分解能에서 6 \AA , 低分解能에서 285 \AA 이다. 이 때에 얻는 S/N은 5이다.

HRS는 data 蓄積 또는 速讀 mode 中 아무것도 可能하다. 積算時間은 最短 50 ms가 可能하다.

HRS는 $S/N=10$ 을 1,000秒內에($1,200 \sim 1,500 \text{ \AA}$ 波域에서) 眼視等級 19까지 BOV星 觀測으로(低分解能) 얻을 수 있고, 中間分解能으로는 16等級, 高分解能으로는 14等級까지 可能하다.

e) 高速測光器 (HSP)

HSP는 地球大氣의 搖動(scintillation) 效果 및 吸收로 因한 地上光電觀測의 難點으로부터 벗어난 利點을 最大限으로 活用한다. 特히 UV波域觀測에 큰 貢獻을 할 것이다.

$1,200 \sim 8,000 \text{ \AA}$ 波域에 걸쳐 積算時間은 不過 10 micro秒까지 可能하며 偏光觀測도 할 수가 있다. 使用되는 diaphragm의 구멍은 直徑 $0''.4, 1''.0, 6''$ 및 $10''$ 角짜리가 있다.

HSP의 detector는 4個의 IDT(image dissector tube)와 1個의 PMT(photo multiplier tube)로 構成되어 있다.

觀測限界는 大略 B-filter 로 2,000 秒 露出과 S/N = 10 을 얻기 위해선, V = 24 等級이다. 여기서 pulse counting system이 採用되어 있는데 그 count-rate는 $m_v=10$ 에 對해 約 50,000/sec 이며, dead-time 은 40 ns 이다.

아주 밝은 별($m_v = 0$ 까지)은 detector로부터 흐르는 電流를 直接 測定하여 얻는다. Pulse counting 할 必要가 없기 때문이다.

많은 數의 可視光線 filter 와 UV filter 가 準備되어 있어서, 1,200 ~ 8,000 Å 波域 中에서 願하는 波帶를 任意로 택할 수가 있다.

3,200 Å 및 7,500 Å 波帶에 있어서는 前者엔 IDT, 後者엔 PMT를 使用한 beam splitter 가 裝置되어 있어서, 兩波長 同時 比較 觀測이 可能하다.

f) 精密追尾感知器 (FGS)

여기에 3개의 FGS가 裝置되어 있어서 서서히 視野를 移動하는 별 또는 asteroid 같은 것의 相對位置를 細密하게 觀測할 수가 있다.

設計上으로는 FOV의 20 arcmin² 를 놓고 0".0016 角을 겨냥하고 있으나 實際 結果는 未定이다. 使用 可能 等級은 $m_v = 4.0 \sim 18.0$ 이다.

正常的 運營에 있어서는 이들 FGS 中の 2個는 HST의 高度維持 調節에 使用되며 나머지 하나가 天文學的 觀測에 利用된다.

이것은 또한 近接連星(分離度가 0".01 ~ 0".1 이며 等級差 $\Delta m_v < 2.5$ 인 경우)의 觀測에도 使用할 計劃이다. 1時間當 150" 角 以內의 相對運動을 하는 것도 觀測 可能하다.

以上 HST에 裝置된 觀測裝備에 關係 說明하였지만 主要한 情報를 다음 表에 整理해 놓았다.

HST Instrument Capabilities

(a) Direct Imaging

Instrument	Field of View	Projected Pixel Spacing on Sky	Wavelength Range (Å)	Magnitude Limit ⁽²⁾
WFC	154" × 154"	0".10	1,150 - 11,000	28
PC	66" × 66"	0".043	1,150 - 11,000	28
FOC f/48	44" × 44"	0".043	1,150 - 6,500	27
f/96	22" × 22"	0".022	1,150 - 6,500	27
f/288	7".3 × 7".3	0".0072	1,150 - 6,500	26

(b) Astrometry

Instrument	Field of View	Positional Accuracy	Wavelength Range (Å)	Magnitude Limit ⁽³⁾
FGS	69 arcmin ⁽²⁾	± 0".0016 ⁽⁴⁾	4,700 - 7,100	17

(c) Photometry

Instrument	Aperture Diameters	Time Resolution	Wavelength Range (Å)	Magnitude Limit ⁽⁵⁾
HSP ⁽⁶⁾	0".4 , 1".0	10 μ s	1,200-9,000	25

(d) Slitless Spectroscopy⁽⁷⁾

Instrument	Projected Pixel Spacing on Sky	Resolving Power ($\lambda/\Delta\lambda$)	Wavelength Range (Å)	Magnitude Limit
WFC	0".10	100	1,600-4,000	22 ⁽⁸⁾
		40	1,300-2,000	21 ⁽⁸⁾
		45	3,000-6,000	23 ⁽²⁾
		35	6,000-10,000	23 ⁽²⁾
FOC f/48	0".043	50 at 1,500 Å	1,150-6,000	22 ⁽⁹⁾
f/96	0".022	50 at 1,500 Å	1,150-6,000	22 ⁽⁹⁾

(e) Slit Spectroscopy

Instrument	Projected Aperture Size	Resolving Power ($\lambda/\Delta\lambda$)	Time Resolution	Wavelength Range (Å)	Magnitude Limit ⁽²⁾
FOC f/48 ⁽¹⁰⁾	0".1 \times 20"	2,000		1,150-1,325	18
		2,000		1,167-1,767	18
		2,000		1,750-2,650	20
		2,000		3,500-5,300	21
FOS ⁽¹¹⁾	0".1 - 4".3	1,300	20 ms	1,150-8,500	18-22-22
		250	20 ms	1,150-8,500	21-26-23
HRS	0".25, 2".0	100,000	50 ms	1,150-3,200	11-14
		20,000	50 ms	1,150-3,200	13-16
		2,000	50 ms	1,150-1,800	17