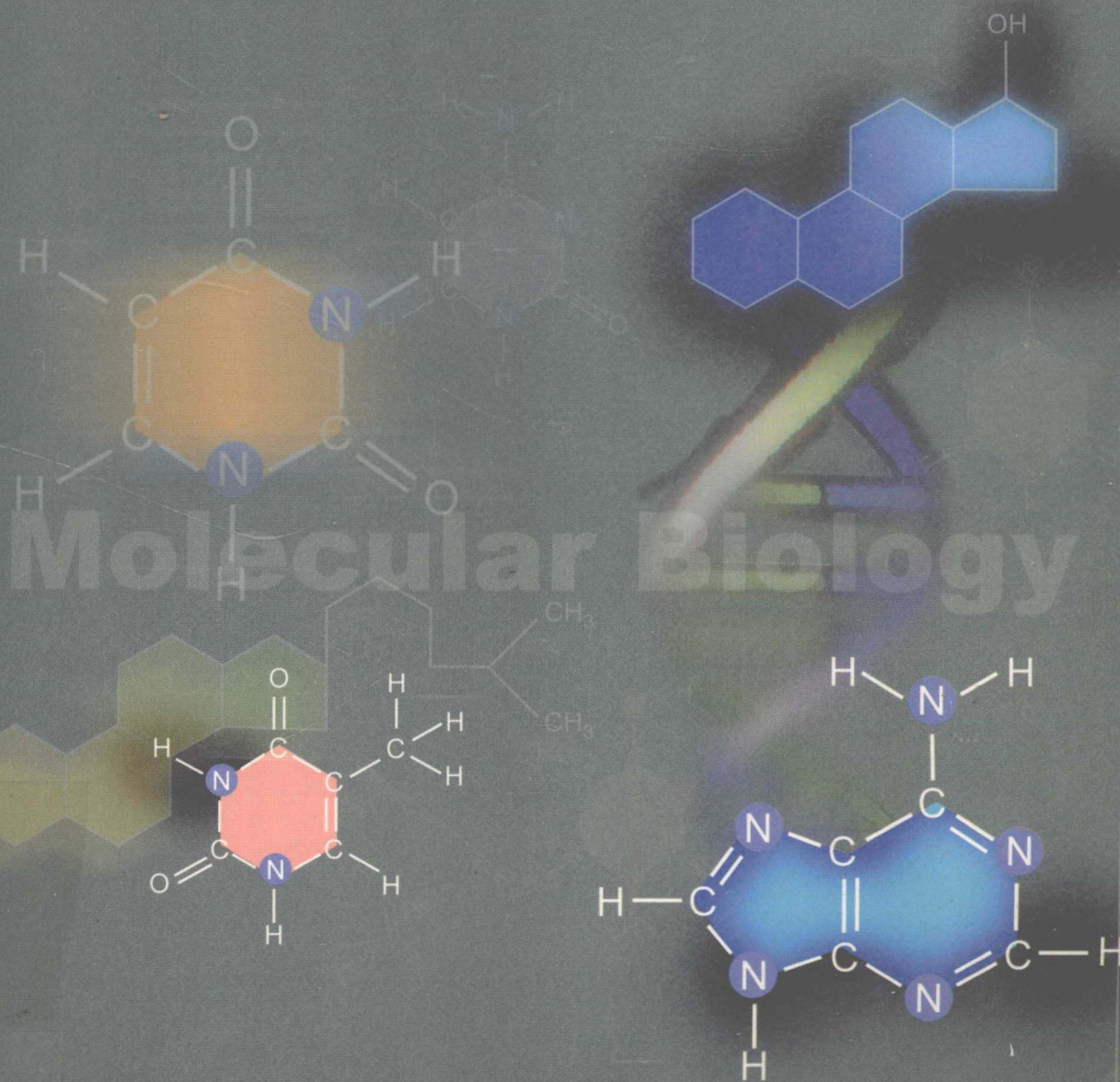


# 分子生物學精要

台灣大學生物化學研究所碩士 姚富洲 編著



合記圖書出版社 發行

三届全国书市样书

# 分子生物學精要

台灣大學生物化學研究所

碩士 姚富洲 編著



00199487



合記圖書出版社 發行

國家圖書館出版品預行編目資料

分子生物學精要 / 姚富洲編著. -- 初版. --

臺北市：合記，民 90

面：公分

含索引

ISBN 957-666-730-5 (平裝)

1. 分子生物學

361.28

90005642

書名 分子生物學精要  
編譯 姚富洲  
發行人 吳富章  
發行所 合記圖書出版社  
登記證 局版臺業字第 0698 號  
社址 台北市內湖區(114)安康路 322-2 號  
電話 (02)27940168  
傳真 (02)27924702

總經銷 合記書局  
北醫店 臺北市信義區(110)吳興街 249 號  
電話 (02)27239404  
臺大店 臺北市中正區(100)羅斯福路四段 12 巷 7 號  
電話 (02)23651544 (02)23671444  
榮總店 臺北市北投區(112)石牌路二段 120 號  
電話 (02)28265375  
臺中店 臺中市北區(404)育德路 24 號  
電話 (04)22030795 (04)22032317  
高雄店 高雄市三民區(807)北平一街 1 號  
電話 (07)3226177

郵政劃撥 帳號 19197512 戶名 合記書局有限公司

中華民國 九十年五月十日 初版一刷

# 編者序

“Molecular biology”顧名思義即為「分子生物學」的意思。大體上來講，自然界的物質都可說是由分子所構成的。以一些巨分子為例，糖類是由單糖分子所組成，脂質 (lipid) 是由脂肪酸所構成的，蛋白質是由胺基酸 (amino acid) 殘基間靠胜肽鍵 (peptide bond) 相接而成的，而遺傳物質 DNA 則是由核苷酸 (nucleotides) 所建構而成的。這些巨分子在自然界中通常扮演相當重要的角色，以核酸分子為例，DNA 是細胞遺傳訊息的儲存者，生物必須靠 DNA 將遺傳訊息一代代的傳遞下去，而分子生物學正是研究相關學問的一門學科。

在研讀分子生物學前，最好能有相關學科之基礎，那麼在研讀過程中才容易有事半功倍之效。一般而言，分子生物學之相關學科有：生物學 (Biology)、生物化學 (Biochemistry)、遺傳學 (Genetics)、微生物學 (Microbiology) 等，在這些學科中，多多少少都會提到生物學之相關概念，而且這些學科間彼此是相通的，通常能對觀念的釐清有所幫助。

分子生物學對許多學生而言似乎是一門複雜而難懂得學科，當許多同學研讀生化課程在進入到「分子生物」這一部份時，常會感到有無從著手的無力感。基本上，分子生物學的準備方式與其他科目大同小異，有很多學生對分子生物之所以感到棘手而無從準備起，主要是因為坊間沒有針對準備分子生物相關考試所編寫的教科書，有鑑於此，筆者從數年前即開始著手收集分子生物相關內容及資料，希望能完成一本分子生物之教科書，協助同學克服心中對分生的恐懼，而能勇敢的面對它，進而征服它。

本書以循序漸進的方式，引導大家進入分子生物學的殿堂，希望能讓各位有入寶山滿載而歸之充實感。本書之內容主要分為四大部分，第一章列出分子生物學歷史上，相關技術的發現及先進之貢獻，也正因為有它們的努力奉獻，人類的生物科技技術才得以逐步的往前邁進，而能有今日之成就；第二單元主要在探討核酸分子之組成及結構，這是在研究此一科目之前所必須具備的基本知識，有許多同學在對 DNA、RNA 都沒有清楚的了解之前，就想把轉錄 (transcription)、轉譯 (translation)、基因表現的調控 (regulation of gene expression) 搞懂，這無異是想一步登天。希望同學能跟隨本單元中，條理分明、循序漸進的引導模式，將核酸分子的結構及功能牢記於心。

本書第三單元在介紹轉錄 (transcription) 及轉譯作用 (translation)，這些作用是基因素現的心臟部份，也是分子生物學中機轉 (mechanism) 較複雜的一部份，希望同學們能有耐心的

加以研讀，本書詳盡的內容必能協助大家對這些複雜的作用更快上手，並在考場上獲得高分。

第四單元在探討基因表現之調控作用及生物技術之應用，由於人類對基因表現的了解越來越深入，因此許多新發現遂成為考試中常見之考題，所以是不可不看之重要單元。此外，隨著生化科技的熱門，生物技術亦更加受到世人矚目，許多新技術讓科學家們的研究更加事半功倍，本書從生化角度切入，包括基因選殖 (gene cloning)、DNA 定序 (DNA sequencing)、雜合作用 (hybridization) 等技術都是必須了然於心的技術，希望在研讀本書後，能使讀者對基因工程有更深一層的認識。

本書在專有名詞方面，對於目前尚無統一譯詞之名詞，則筆者盡可能採用原文呈現，不勉強使用翻譯之名詞，因為未統一之詞彙，各家翻譯出來的詞彙不盡相同，而且許多詞彙在勉強予以中文化後相當拗口難唸，若勉強將之翻成中文，不僅造成讀者在閱讀上之困難，也許也將增加考試時閱卷人員之困擾。

分子生物之相關技術是 21 世紀之新興科技，隨著遺傳工程技術的突飛猛進，基因的改造對現今之科學家而言，似乎已不再是難事，但隨之而來的是人類在主宰生命後所面臨相關的道德問題。大家在從事相關研究時，除了要將所追求的成就擺在前面外，希望也能對隨之而來的種種道德問題有所省思，也許，這對後代子孫才是有所幫助的傑出成就吧！

# 目錄

## 分子生物學精要

第一章 歷史	1
⇒ 分子生物學上重要之歷史沿革	1
第二章 化學作用力之重要性	5
⇒ 前言	5
⇒ 化學鍵之鍵能 (Bond Energy of Chemical Bonds)	5
⇒ 氫鍵 (Hydrogen Bonds)	6
⇒ 凡得瓦力 (Van der Waals Interaction)	9
⇒ 疏水性作用力 (Hydrophobic Interaction)	10
⇒ 離子鍵 (Ionic Bonds)	11
⇒ 弱化學鍵在分子構形維持上之重性	12
第三章 病毒	15
⇒ 病毒	15
⇒ 病毒感染宿主細胞之機轉	17
⇒ 逆轉錄病毒	19
⇒ RNA 腫瘤病毒 (RNA Tumor Virus)	22
⇒ HIV 病毒	22
⇒ 病毒在感染宿主細胞後核酸的複製機轉	23
⇒ 病毒顆粒自宿主細胞釋出的作用	26
⇒ 噬菌體 DNA 插入宿主細胞染色體的作用 (The Integration of Bacteriophage DNA Into Host Chromosome DNA)	26
⇒ 噬菌體在生物工程上之應用	28



## 第四章 核酸的結構及功能

29

- ⇒ 前言 29
- ⇒ 核酸 (nucleic acid) 29
- ⇒ 互變異構作用 (Tautomerization) 35
- ⇒ 核酸的種類 36
- ⇒ 遺傳物質—DNA 37
- ⇒ DNA的結構 40
- ⇒ DNA 的種類 45
- ⇒ DNA的立體結構 48
- ⇒ DNA的拓樸性質 48
- ⇒ DNA分子形狀 (Shapes of DNA Molecules) 49
- ⇒ 核體 (Nucleosome) 51
- ⇒ 染色體 (Chromosome) 56
- ⇒ DNA雙股的分離及回復作用 (Dissociation and Reassociation of the Double Strand DNA) 58
- ⇒ 核酸的性質 (Properties of Nucleic Acids) 59
- ⇒ 真核細胞胞器內的DNA (DNA in Eukaryotic organelles) 62
- ⇒ 核酸分子的水解反應 (Hydrolysis of Nucleic Acids) 63
- ⇒ 核酸的一般反應 64
- ⇒ 真核DNA的變異性 (Heterogeneity of Eukaryotic DNA) 66

## 第五章 DNA之構形

69

- ⇒ 一些特殊的DNA構形 69
- ⇒ DNA超螺旋結構 (Supercoil structure of DNA) 73
- ⇒ 核酸酶 (Nuclease) 75
- ⇒ 限制酶 (Restriction Enzymes) 78
- ⇒ 限制酶的種類 (Classification of Restriction Enzymes) 79
- ⇒ DNA的切割片斷 82
- ⇒ DNA接合酶 (DNA Ligase) 83

## 第六章 DNA複製作用

87

- ⇒ DNA複製 (DNA replication) 87
- ⇒ Meselson-Stahl 實驗 88
- ⇒ Cairn's 實驗 90
- ⇒ DNA的複製方式 91
- ⇒ DNA的複製系統 (DNA replication system) 92
- ⇒ DNA聚合酶 (DNA polymerase) 93

- ⇒ DNA 聚合酶 I 的結構 (Structure of DNA Polymerase I) 96
- ⇒ DNA 聚合酶 III (DNA polymerase III) 97
- ⇒ DNA 聚合酶 II (DNA polymerase II) 99
- ⇒ 真核細胞的 DNA 聚合酶 (Eukaryotic DNA Polymerase) 99
- ⇒ DNA 複製的起始點 (Origin of DNA Replication) 101
- ⇒ DNA 複製的起始作用 (Initiation of DNA Replication) 101
- ⇒ DNA 的複製機轉 (Mechanism of DNA Replication) 104
- ⇒ 粒線體 DNA 的複製作用 (Replication of Mitochondrial DNA) 109
- ⇒ DNA 複製之準確度 (Fidelity of DNA Replication) 111
- ⇒ 病毒 DNA 的複製 (Replication of Viral DNA) 111
- ⇒ DNA 複製的抑制作用 (Inhibition of DNA Replication) 120

## 第七章 轉錄作用

123

- ⇒ 轉錄作用 (transcription) 123
- ⇒ 中心信條 (central dogma) 123
- ⇒ RNA 的結構 (RNA Structure) 126
- ⇒ RNA 的二級結構與三級結構 (secondary structure and tertiary structure) 127
- ⇒ RNA 的種類 (Types of RNA) 129
- ⇒ mRNA 的分解 (Turnover of mRNA) 139
- ⇒ 粒線體 RNA (mitochondrial RNA) 及其他較小的 RNA 分子 140
- ⇒ 轉錄作用 (Transcription) 141
- ⇒ 轉錄作用的機轉 (Mechanism of Transcription) 143
- ⇒ 促進子 (Promoter) 146
- ⇒ 轉錄作用的過程 (The Procedures of Transcription) 149
- ⇒ 原核細胞 (prokaryotes) 與真核細胞 (eukaryotes) RNA 聚合酶的比較 154
- ⇒ RNA 分子的加工作用及剪接作用 (Processing and Splicing of RNA Molecules) 155
- ⇒ 真核細胞 mRNA 的加工作用 (Processing of Eukaryotic mRNA) 157
- ⇒ RNA 的剪接作用 (Splicing of RNA) 163
- ⇒ 一相同的基因經不同的 RNA 加工作用 (splicing) 可以有多种不同產物的產生 165
- ⇒ 剪接作用之機轉 (Mechanism of Splicing) 168
- ⇒ 轉錄作用的抑制劑 (Inhibitors of Transcription) 176
- ⇒ 基因表現的調控 (The Regulation of Gene Expression) 178
- ⇒ 調節蛋白與 DNA 結合的特殊結構 181
- ⇒ 蛋白質與蛋白質間交互作用之特殊結構 184

## 第八章 轉譯作用

187

- ⇒ 前言 187
- ⇒ 遺傳密碼與蛋白質的合成 (The Genetic Code and Protein Synthesis) 187



- ⇒ 遺傳密碼的特性 (The Properties of Genetic Code) 193
- ⇒ 蛋白質的合成 (The Synthesis of Protein) 196
- ⇒ 胺基酸的活化 (Activation of Amino Acids) 198
- ⇒ 起始階段 (Initiation Stage) 200
- ⇒ 延長階段 (Elongation Stage) 203
- ⇒ 終止作用 (Termination) 205
- ⇒ 真核細胞的蛋白質合成作用 (Protein Synthesis in Eukaryotes) 209
- ⇒ 真核細胞蛋白質合成之作用機轉 (Mechanism of Eukaryotic Protein Synthesis) 210
- ⇒ 終止作用 (Termination) 212
- ⇒ 蛋白質合成作用之抑制劑 (Inhibitors of Protein Synthesis) 213
- ⇒ 蛋白質的運送 (Protein Transport) 218
- ⇒ 蛋白質的摺疊作用 (Protein Folding) 219
- ⇒ 蛋白質的分解作用 (Protein Degradation) 220

## 第九章 基因表現之調控作用

223

- ⇒ 前言 223
- ⇒ 基因調控作用之種類 223
- ⇒ 轉錄作用調控之相關因子 226
- ⇒ 原核細胞的調控作用—操作基因組 (Operon) 228
- ⇒ 乳糖操作基因組 (lac operon) 231
- ⇒ 操作基因組的調控 (Regulation of operon) 234
- ⇒ 噬菌體  $\lambda$  基因表現之調控作用 (Gene Expression Regulation of Bacteriophage  $\lambda$ ) 239
- ⇒ 突變作用 (mutation) 對操作基因組 (genome) 表現的影響 244
- ⇒ Lactose Operon 之調控作用 (Regulation of Lactose Operon) 246
- ⇒ 色胺酸操作基因組 (Tryptophan Operon) 251
- ⇒ 弱化作用的機轉 (Mechanism of Attenuation) 253
- ⇒ 操作基因群 (Regulon) 256
- ⇒ 真核細胞基因表現的調控作用 (Regulation of Eukaryotic Gene Expression) 258
- ⇒ 基因重排作用 (Gene Rearrangement) 260

## 第十章 DNA 之修補作用

265

- ⇒ DNA 的修補作用 (DNA repair) 265
- ⇒ 光活化作用 (Photoreactivation) 266
- ⇒ 烷基化作用 (Alkylation) 268
- ⇒ 剪除修補作用 (Excision Repair) 270
- ⇒ DNA 複製後的修補作用 (Postreplicational Repair) 274
- ⇒ SOS 修補作用 (SOS Repair) 276
- ⇒ 配對錯誤修補作用 (Mismatch Repair) 280

- ⇒ 重組作用 (Recombination) 284
- ⇒ 同源性基因的基因重組作用 (Homologous Genetic Recombination) 286
- ⇒ 移位性的重組作用 (Transpositional Recombination) 288
- ⇒ 特定位置的重組作用 (Site-specific Recombination) 289
- ⇒ 移位作用 (Transposition) 290

## 第十一章 突變

295

- ⇒ 基因突變 (Gene Mutation) 295
- ⇒ 突變的發生 299
- ⇒ 致變物的種類 (Types of Mutagens) 300
- ⇒ 同分異構物的互變作用 (Tautomerization) 303
- ⇒ 鹼基類似物 (Base Analogue) 305
- ⇒ 鹼基改變物 307
- ⇒ 烷化劑 (Alkylating Agents) 308
- ⇒ 架構移改 (frameshift) 物質 309
- ⇒ 物理性致變劑 (Physical Mutagens) 311
- ⇒ 生物性致變劑 (Biological Mutagens) 312
- ⇒ 回復作用 (Reversion) 316
- ⇒ 阻遏作用 (Suppression) 318

## 第十二章 嘌呤與嘧啶之代謝作用

321

- ⇒ 前言 321
- ⇒ 消化作用 (Digestion) 321
- ⇒ 嘌呤核苷酸之合成 (Synthesis of Purine Nucleotides) 323
- ⇒ 嘌呤核苷酸的生成 (Formation of Purine Nucleotide) 329
- ⇒ 嘌呤去氧核糖核苷酸的生成 (Formation of Purine Deoxynucleotide) 329
- ⇒ 嘌呤之回收途徑 (Salvage Pathway of Purine) 330
- ⇒ 嘌呤合成的調控作用 (Regulation of Purine Synthesis) 332
- ⇒ 嘌呤之代謝 (Metabolism of Purine) 333
- ⇒ 嘌呤代謝與痛風 (gout) 之關係 334
- ⇒ 嘧啶 (pyrimidine) 之合成 335
- ⇒ 嘧啶核糖核苷之回收途徑 (Salvage Pathway of Pyrimidine Ribonucleoside) 336
- ⇒ 嘧啶之分解性代謝作用 (Catabolism of Pyrimidine) 337
- ⇒ 嘧啶合成之調節 (Regulation of Pyrimidine Synthesis) 337
- ⇒ 去氧核糖核苷酸的合成及其代謝 (Deoxyribonucleotide Biosynthesis and Metabolism) 339
- ⇒ 嘌呤之代謝疾病 (Metabolic Disorder of Purine Catabolism) 343
- ⇒ 嘧啶之代謝疾病 (Metabolic Disorder of Pyrimidine Catabolism) 345

## 第十三章 生物技術

347

- ⇒ 前言 347
- ⇒ 生物工程概論 347
- ⇒ 細胞選殖 (Cell Cloning) 353
- ⇒ 載體 (Vectors) 354
- ⇒ 質體 (Plasmids) 360
- ⇒ 聚合酶連鎖反應 (Polymerase Chain Reaction, PCR) 364
- ⇒ 寡核苷酸鏈的合成 (The Synthesis of Oligonucleotide) 367
- ⇒ 利用基因重組技術進行疾病之分子分析 368
- ⇒ 基因重組技術的應用 373
- ⇒ 基因治療 (Gene Therapy) 374
- ⇒ DNA 定序 (DNA Sequencing) 375
- ⇒ 雜合作用 (Hybridization) 379
- ⇒ Footprinting Technique 384
- ⇒ 單株抗體 (Monoclonal Antibody) 386
- ⇒ 定位突變 (Site-directed Mutagenesis) 387

## 索引

391

# 第一章 歷史 History

## 分子生物學上重要之歷史沿革

在分子生物學時代巨輪的進展中，許多科學家默默的辛苦貢獻，才得以讓今日的生物科技有如此卓越的進步。爲了讓各位對歷史上生物技術及重大發現出現的順序有個初步的概念，在此特別將這些學者們偉大的發現摘錄於下：

- (1) Mendal 提出遺傳學上重要的假說。
- (2) 1871 年從膿細胞分離出一種含磷的酸性物質。
- (3) 1889 年 Altmann 首次提出“核酸”之說法。
- (4) 1890 年發現細胞核內之染色體是由核蛋白所組成的。
- (5) Sumner 將 urease 結晶出來。
- (6) Morgan 等人以果蠅 (*Drosophila*) 爲研究對象，研究遺傳學。
- (7) Svedberg 發展超高速離心 (ultracentrifuge) 的技術。
- (8) 電子顯微鏡 (electron microscope) 的發明。
- (9) 1944 年 Oswald T. Avery、Colin MacLeod 及 Maclyn McCarty 等人認爲：DNA 是遺傳訊息 (genetic information) 傳遞的媒介 (agent)。
- (10) Sanger 及 Tuppy 首先決定出胰島素 (insulin) 之初級結構 (primary structure)，亦即胰島素胺基酸之排列順序。
- (11) 1952 年 Alfred D. Hershey 及 Martha Chase 建立 DNA 爲遺傳物質 (genetic material) 的觀念。
- (12) Pauling 及 Corey 兩人將核酸之螺旋結構 (helix structure) 的觀念應用於蛋白分子之二級結構 (secondary structure)。
- (13) 1953 年 Watson 及 Crick 提出 DNA 的結構爲雙螺旋結構 (double helix structure)。
- (14) 1950 年代中期，Arthur Kornberg 首次以活體外 (*in vitro*) 的方

式，以人工合成法在試管中合成DNA。

- (15) 1955年 Marianne Grunberg-Manago 及 Severo Ochoa 發現一細菌酵素 polynucleotide phosphorylase 的存在，此酵素可催化：



- (16) 1955年 DNA polymerase I 被分離出來。
- (17) 1956年 Holley 首次完成酵母菌 Ala-tRNA 核苷酸之排列順序。
- (18) 1957年 Mattheew Meselson 及 Franklin Stahl 以 CsCl 密度梯度離心法證明DNA的複製方式為半保留 (semiconservative) 的複製方式
- (19) Perutz 首先利用  $x$ -光繞射方式決定出蛋白質的立體結構。
- (20) Nirenberg、Ochoa 及 Khorana 等人研究遺傳密碼與胺基酸間之關係。
- (21) 1961年 Monad 及 Jacob 提出操作基因組 (operon) 假說。
- (22) 1961年 Dintzis 研究發現蛋白質的合成方向是由N端開始向C端進行。
- (23) 1962年 Howard Temin 提出逆轉錄酶 (reverse transcriptase) 的存在，1970年 Howard Temin 及 David Baltimore 證實在某些DNA病毒中含有逆轉錄酶的存在。
- (24) 1968年 Reiji Okazaki 提出DNA複製時 lagging strand 的觀念，故 lagging strand 又名岡崎片段 (Okazaki fragment)。
- (25) 1973年，Herbert Boyer 及 Stanley Cohen 發現可以利用限制酶 (restriction enzyme) 來進行基因選殖 (gene cloning)。
- (26) 1974年，Roger Kornberg 根據一些研究證據提出染色質 (chromatin) 是由一些重複的單元所組成，這些重複單元後來證實為核體 (nucleosome)。
- (27) 1975年，Georges Kohler 及 Cesar Milstein 發現以骨髓瘤細胞 (myeloma cell) 及B淋巴細胞 (B lymphocytes) 的融合細胞可用來製備具專一性的抗體，後來改良成為單株抗體 (monoclonal antibody) 之生產技術。
- (28) 1977年，Allan Maxam 及 Walter Gilbert 以化學方法定DNA序列
- (29) 1977年，Sanger 發展出所謂「鏈中止定序法」 (chain terminator sequencing procedure) 的DNA定序法。Sanger 與 Gilbert 同時獲1980年之諾貝爾化學獎。
- (30) Nathan 等人利用限制酶 (restriction enzyme) 分析動物病毒的DNA序列，成功定出SV40病毒的核苷酸序列。
- (31) Berg 等人利用細菌成功完成遺傳工程 (genetic engineering) 在原核細胞的運用，並將真核細胞的基因利用細菌表現，為遺傳工

程揭開序幕。

- (32) 周正在分析腺病毒的 mRNA 時發現 mRNA 的剪接作用 (splicing) 存在，並了解到絕大部分的真核細胞，其基因都是不連續的 (discontinuous)。
- (33) Weinberg 及 Bishop 等人，在研究腫瘤病毒時發現致癌基因 (oncogene) 原本就存在於正常細胞中，使得人們對癌症的致病機轉及致癌基因有更深的認識。
- (34) Tonegawa 等人由免疫球蛋白 (immunoglobulin) 基因的重組，說明了抗體變異性 (diversity) 的產生機轉及真核細胞基因重組的機制。
- (35) 1987 年，PCR 技術應用於大量生產核酸分子，此技術是由 Mullis 所提出。

生物技術的新發現常常是由於前人努力的累積而來的，而且許多技術及發明在時空上常常無法很明確的來加以區分。因此若要將某一技術的發明完全歸功於某一特定的學者，道理上來說應該是過於牽強的，畢竟唯有集眾人之努力，新知及新技術的發現才能日新月異，而這也是鞭策我們更加精益求精的動力。





## 第二章 化學作用力之重要性

### The Importance of Chemical Interaction

---

#### 前 言

在探討分子生物之前，對於維繫分子間彼此結合之作用力不可不知。在細胞內，各個分子間的排列 (arrangement) 及功能的行使，通常弱化學作用力 (weak chemical interaction) 的存在，扮演重要角色。這些作用力有時稱為二級鍵 (secondary bond)，不僅存在於不同分子間之原子間，它也存在於同一分子內的各個原子間。

這些弱化學作用力的強度雖然不及共價鍵 (covalent bond) 強度，但是它們在聚核苷酸鏈 (polynucleotide) 及多胜肽鏈 (polypeptide) 構形的形成及分子柔軟度 (flexibility) 的維持，卻十分重要。因此進一步了解這些作用力的性質及它們作用的機轉，對於分子生物學的認識必有相當的助益。這些弱的作用力包括有：氫鍵 (hydrogen bond)、凡得瓦力 (van der Waals interaction)、疏水性作用力 (hydrophobic interaction) 及離子鍵 (ionic bond)，以下將就這些作用力一一說明。

---

#### 化學鍵之鍵能

#### (Bond Energy of Chemical Bonds)

##### □ 鍵能 (bond energy)

- (1) 所謂鍵能 (bond energy) 是指打斷一化學鍵所需之能量，當兩原子間有鍵形成時，通常有內能 (internal energy) 的釋出，並轉成其他形式釋放。當所形成的鍵的強度愈強，則釋出之能量愈

大，可以下式表示：



(反應之速率決定於A及B之碰撞頻率)

- (2) 所生成之化學鍵並不一定是恆久不斷的，有時其他分子或原子的再碰撞可造成化學鍵的斷裂，這是因為碰撞分子的動能提供了鍵斷裂所需的能量，分子移動動能越大（溫度越高），造成鍵斷裂的機率越大。因此一般而言，溫度愈高，鍵的穩定性 (stability) 愈低：



打斷一化學鍵所需之能量，等於此鍵生成時所需之能量。

- (3) 弱鍵的鍵能約介於 1 kcal/mol 到 7 kcal/mol 之間，已知弱化學作用力有氫鍵、凡得瓦力、疏水性作用力及離子鍵，其中最弱的作用力是凡得瓦力，介於 1 kcal/mol 到 2 kcal/mol 間，約只略大於熱運動之動能 (kinetic energy of heat motion)。
- (4) 氫鍵及離子鍵之鍵能約介於 3~7 kcal/mol 之間，即使是最強之弱化學作用力亦僅有熱運動動能 (0.6 kcal/mol) 10 倍左右，因此在一般生理溫度 (physiological temperature) 狀態下，這些弱化學作用力可生成或被打斷 (broken)，並不會造成化學反應進行之障礙。
- ☛ 共價鍵 (covalent bond) 是屬於強的鍵結，它的鍵能較氫鍵、離子鍵等非共價鍵強很多，它的  $\Delta G$  約介於 -50 kcal/mol 到 -110 kcal/mol 之間。

## ■—————■ 氫鍵 (Hydrogen Bonds)

- (1) 氫鍵的形成主要是由一供給者 (donor) 提供一氫原子給接受者分子 (acceptor)，例如亞胺基基團 (NH) 的氫原子與酮基基團 (C=O) 氧原子之間之作用力 (如圖所示)：