

## ١١ - ميتابوليزم البروتينات Metabolism of Proteins

الأستاذ الدكتور/ محمد محمود يوسف

مقدمة :

أوضحت الدراسات أن البروتينات في جسم الحيوان تتوازن ديناميكيا بين عمليتي الهدم catabolism والبناء anabolism. وفي حالة الانسان البالغ السليم يتحقق هذا التوازن، في حين أنه في حالة الاطفال يكون في اتجاه البناء بمعدل أكبر يعكس الحال بالنسبة للمسنين. وعند تناول الانسان لغذاء يحتوي على البروتين فان الأخير يتحلل مائيا بفعل الانزيمات المحللة للبروتين (الانزيمات البروتيو ليتيه proteolytic enzymes) والنتاج النهائي للتحليل هو عبارة عن الأحماض الأمينية المكونه لهذا البروتين. والأحماض الأمينية الناتجة تسلك مسلكا من ثلاثة:

الأول: تدخل في بناء بروتينات الجسم

الثاني: تدخل في بناء مركبات حيوية أخرى كالفيتامينات ، الأصباغ ، معاونات الانزيمات الهرمونات.

الثالث: يحدث لها هدم عن طريق عملية نزع مجموعة الأمين deamination فتتحول الى أحماض ألفا كيتونية وأمونيا.

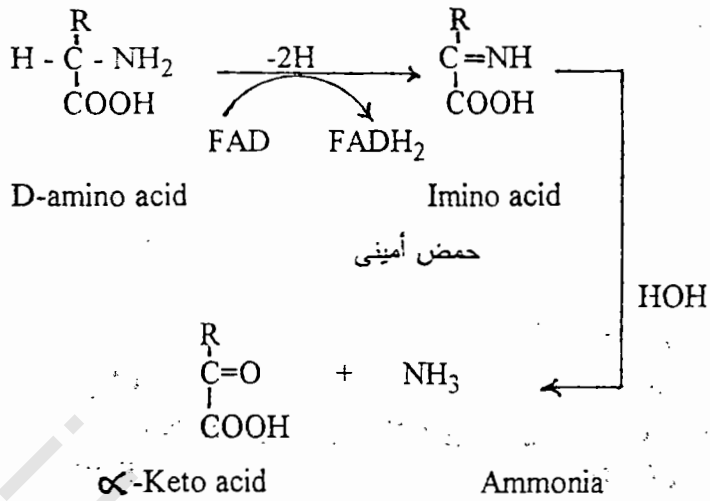
ويمكن تلخيص هذه التحولات للأحماض الأمينية في الشكل رقم ١١-١.

والأحماض الأمينية بعد نزع مجموعة الأمين منها deamination تتحول الى أحماض ألفا كيتونية ، وهذه اما أن تتجه لبناء الكربوهيدرات ومركباتها الوسطية او الى بناء الليبيدات ومركباتها الوسطية ، بمعنى أن الاحماض الأمينية تعمل كنقطة ربط بين ميتابوليزم البروتينات وميتابوليزم كل من الكربوهيدرات والليبيدات.

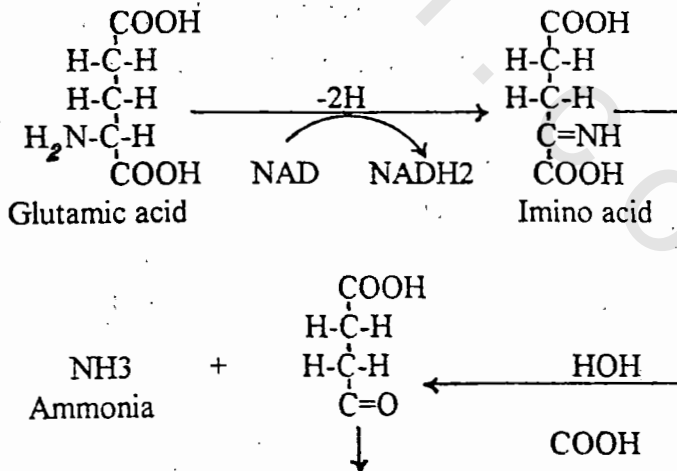
وتسمى الأحماض الأمينية التي تؤدي الى رفع نسبة الجلوكوز بالأحماض الأمينية الجلوكوجينية glucogenic وهي تشمل على الأحماض الأمينية التالية:

الألاتين - سيرين - ثريونين - سيستين - سستين - ميثيونين - فالين - حمض الأسبارتيك  
حمض الجلوتاميك - أرجنين - هستين - تربتوفان - برولين - هيدروكسي برولين.





ونما كانت الأنزيمات التي تحفز هذا التفاعل تعمل على الصورة D فسي حين أن الأحماض الأمينية كما نعلم توجد في الطبيعة على الصورة L - فإنه يعتقد بأن هذا الميكانيزم ليس من الطرق الرئيسية لازالة مجموعة الأمين في الحيوانات ، غير أنه يوجد أنزيم واحد من أنزيمات amino acid oxidases يعمل على الصورة L وهو أنزيم L-glutamic acid dehydrogenase وهو يحفز تفاعلا على جانب كبير من الأهمية من الوجهة الحيوية حيث يتحول من خلاله حمض الجلوتاميك الى حمض ألفا كيتوجلوتاريك الذي يأخذ مساره الى دورة حمض الستريك :



$\alpha$ -Keto glutaric acid الى دورة حمض الستريك

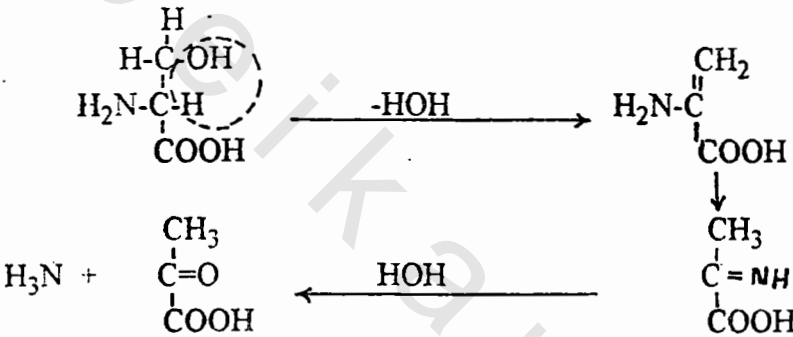
ويوجد أنزيم L-glutamic acid dehydrogenase بوفرة في الكبد والكلى ، ويتميز التفاعل السابق بأنه تفاعل عكسي أي يحدث في الاتجاهين الأمامي والخلفي .

## ٢- الازالة غير التأكسدية لمجموعة الأمين :Non-Oxidative Deamination

تتم الازالة غير التأكسدية لمجموعة الأمين بفعل أنزيمات amino acid hydrolases وتتم هذه العملية بأحدى طريقتين :

الطريقة الأولى : نزع جزيء ماء من الأحماض الأمينية الهيدروكسيلية :

ومثال ذلك نزع مجموعة الأمين من الحمض الهيدروكسيلي سيرين ، ويتم التفاعل كما يلي :



حمض البيروفيك Pyruvic acid

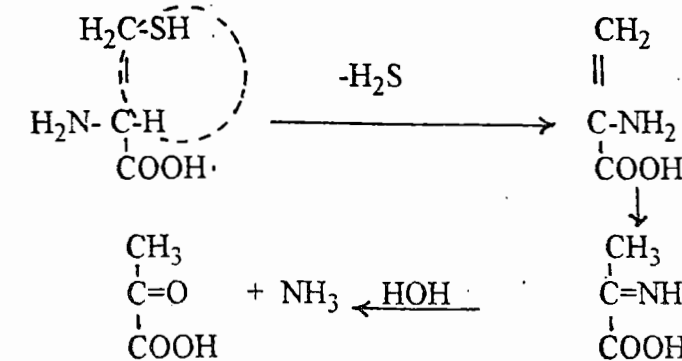
حمض ايميني Imino acid

الى دورة حمض الستريك

الطريقة الثانية : نزع مجموعة السلفهيدريل -SH :

ومثال ذلك الحمض الأميني سيستئين حيث تزال مجموعة -SH بدلا من جزيء الماء ، ويتم

التفاعل كما يلي :



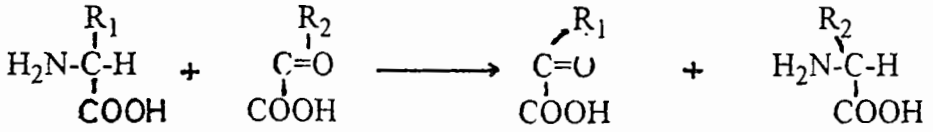
حمض البيوفيك Pyruvic acid

حمض ايميني Imino acid

ويحفز التفاعل أنزيم desulfhydrase .

## ٣- نقل مجموعة الأمين Transamination:

يمكن نقل مجموعة الأمين من الحمض الأميني الى حمض كيتوني آخر حيث يتحول الحمض الأميني الى حمض كيتوني بينما يتحول الحمض الكيتوني الى حمض أميني كما يلي:



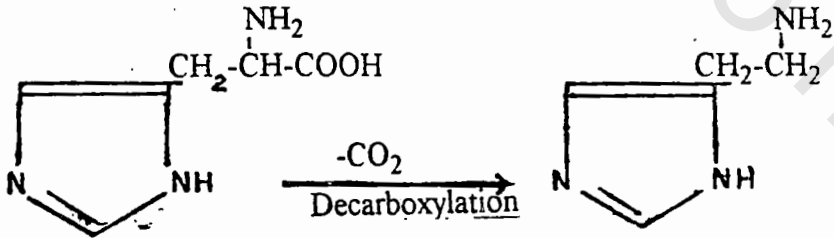
حمض أميني                      حمض كيتوني                      حمض كيتوني                      حمض أميني

ويتم تحفيز هذا التفاعل بواسطة انزيمات الـ amino acid transferases وإذا كان الحمض الكيتوني هو البيروفيك فإنه يتحول الى الألاتين - أما إذا كان جلوتاريك فإنه يتحول الى جلوتاميك في حين لو كان الحمض الكيتوني أكسالو أسيتيك فإنه يتحول الى الحمض الأميني أسبارتيك.

## ٤- ازالة مجموعة الكربوكسيل Decarboxylation:

سبق شرح ميكانيكية هذا التفاعل في سياق حديثنا عن تفاعلات الأحماض الأمينية (الباب الثالث). وتتأتى أهمية هذا التفاعل من تكوينه لبعض الأمينات مثل الثيرامين والهستامين فالأول يعمل كقابض للأوعية الدموية بينما يؤدي الثاني الى تمددها. وتفاعل ازالة مجموعة الكربوكسيل يحفز بواسطة انزيمات الـ decarboxylases.

وفيما يلي تفاعل ازالة مجموعة الكربوكسيل من الحمض الأميني هستدين لتكوين الهستامين histamine ، ومن المعروف أن بعض المنتجات البحرية خاصة أسماك التونة تحتوى على كميات محسوسة من الهستامين مما يؤدي الى اصابة بعض الأشخاص الذين يتناولون مثل هذه المنتجات ببعض أعراض الحساسية.



نزع مجموعة الكربوكسيل

هستدين Histidine

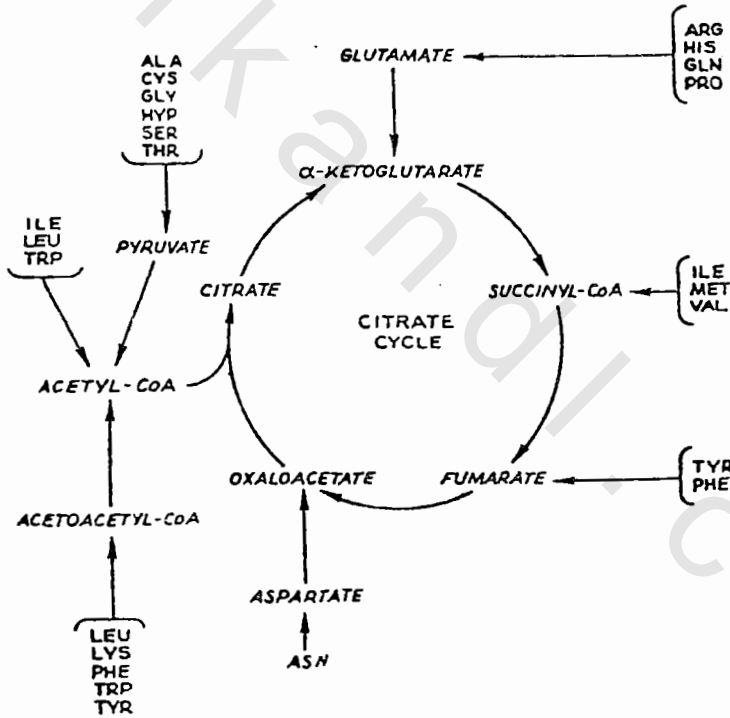
هستامين Histamine

وتجدر الإشارة هنا الى أن التفاعلات التي سبق ذكرها هي تفاعلات كيميائية عامة للأحماض الأمينية حيث أن لكل حمض أميني مساراته الميثابوليزمية الخاصة به.

## هدم للهياكل الكربونية للأحماض الأمينية

## Catabolism of the carbon skeletons of amino acids

يبين الشكل رقم ٢-١١ المكونات الوسيطة التي يعتقد تكونها من الهياكل الكربونية للأحماض الأمينية عند هدمها.



شكل ٢-١١: التحولات المعتقد حدوثها amphibolic للهياكل الكربونية للأحماض الأمينية عند هدمها.

وكما هو واضح من الشكل رقم ٢-١١ فإن الأحماض الأمينية تقسم من وجهة هدم هيكلها

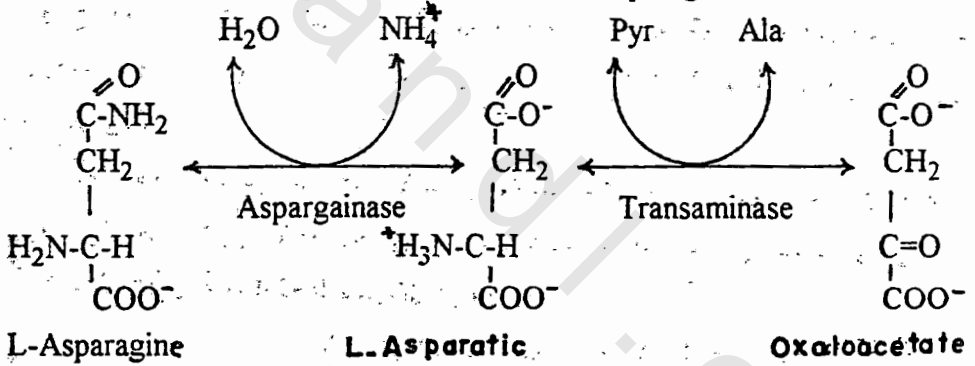
الكربوني إلى خمس مجموعات هي :

- ١- أحماض أمينية تكون أوكسالوأسيتاتيات  
 Oxaloacetate  
 ٢- أحماض أمينية تكون ألفا كيتوجلوتارات  
 $\alpha$ -Ketoglutarate  
 ٣- أحماض أمينية تكون البيروفات  
 Pyruvate  
 ٤- أحماض أمينية تكون أسيتايل كوانزيم أ  
 Acetyl-coenzyme A  
 ٥- أحماض أمينية تكون سكسانيل كوانزيم أ  
 Succinyl-Coenzyme A

١- الأحماض الأمينية التي تكون الأوكسالوأسيتات

### Amino acids forming oxaloacetate

وتشتمل هذه الأحماض على الاسبارتات aspartate والاسباراجين asparagine حيث تتحول ذرات الكربون الأربع للأسبارتات أو الأسباراجين إلى أوكسالوأسيتات oxaloacetate بفعل تحفيز أنزيمات asparaginase والـ transaminase كما يلي:



٢ - الأحماض الأمينية المكونة للألفا كيتوجلوتارات

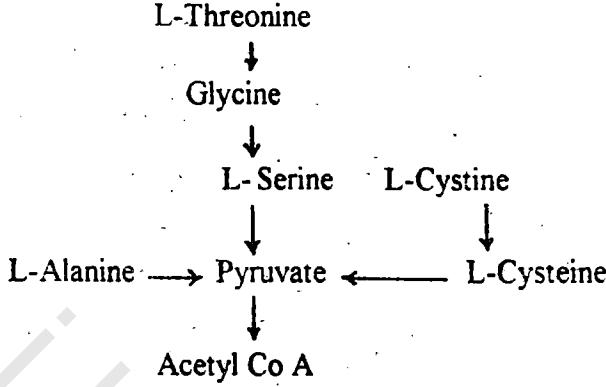
### Amino acids forming $\alpha$ -ketoglutarate

وتشتمل هذه الأحماض على الجلوتامين ، البرولين ، الأرجينين ، الهستيدين .

٣- الأحماض الأمينية المكونة للبيروفات Amino acids forming pyruvate

يوضح الشكل رقم ١١-٣ مسارات تحول الهياكل الكربونية لكل من الألاتين ، سيسنتين ، سيسنتين ، جليسين ، تربونين ، وسيرين إلى البيروفات. ويلاحظ أن ذرتي الكربون المكونتين للجليسين وكذا ذرات الكربون الثلاث المكونة لكل من الألاتين ، سيسنتين ، السيرين تتحول

الى بيروفات ، ولكن فى حالة التريونين فان ذرتى كربون فقط تشاركان فى تكوين البيروفات. ويمكن بعد ذلك تحول البيروثينات الى أسيتايل كوانزيم أ (Acetyl Coenzyme A).



شكل ١١-٣: مسارات تحول بعض الأحماض الأمينية الى البيروفات.

٤- الأحماض الأمينية المكونة للأسيتايل كوانزيم أ Amino acids forming acetyl Co  
جميع الأحماض الأمينية التى تكون البيروفات (الأتين ، سيستين ، سيستين ، جليسين ، هيدروكسى بروفين ، سيرين ، ثريونين) يكون فى مقدورها تكوين الأسيتايل كو أنزيم بدون تكوين البيروفات.

وتشتمل هذه الأحماض أيضا على الأحماض الأمينية الحلقية وهى الفينايل الأتئين، تيروسين، تريوفان والحمض الأمينى القاعدى ليسين والحمض الأمينى المتعادل متفرع السلسلة ليوسين.

٥- الأحماض الأمينية المكونة للسكسينايل كو أنزيم أ

Amino acids forming succinyl coenzyme A

على الرغم من أنه يعتقد أن succinyl Co A وهو الناتج النهائى لمسارات هدم كل من

الأحماض الأمينية التالية:

ميثيونين - أيزوليوسين - فالين على الرغم من ذلك فان جزءا من سلاسل هذه الأحماض هو الذى يتم تحوله.

تحول الأحماض الأمينية الى المنتجات المتخصصة

Conversion of Amino Acids to Specialized Products

الأحماض الأمينية تعد بمثابة المصدر الأول للنتروجين بالنسبة للحيوانات. وتعمل الأحماض الأمينية ك precursors لمركبات نتروجينية أخرى التى تشتمل على الهيم،



البيورينات ، البيريميدينات ، الهرمونات ، أضف الى ذلك أن عديدا من البروتينات تحتوى على أحماض أمينية محورة modified للقيام بوظيفة حيوية خاصة مثل ربط الكالسيوم من خلال روابط عرضية ومن ثم فإن متبقيات الأحماض الأمينية amino acid residues فى تلك البروتينات تعمل كبدائنات precursors لهذه البروتينات المحورة.

وتجدر الإشارة هنا الى وجود ببتيدات أو مركبات شبيهة بالببتيدات لا يتم تخليقها على الريبوسومات ( أماكن التخليق الحيوى للبروتينات بالخلية ) ولكن توجد لمثل هذه البروتينات وظائف حيوية متخصصة.

### هدم نتروجين الأحماض الأمينية

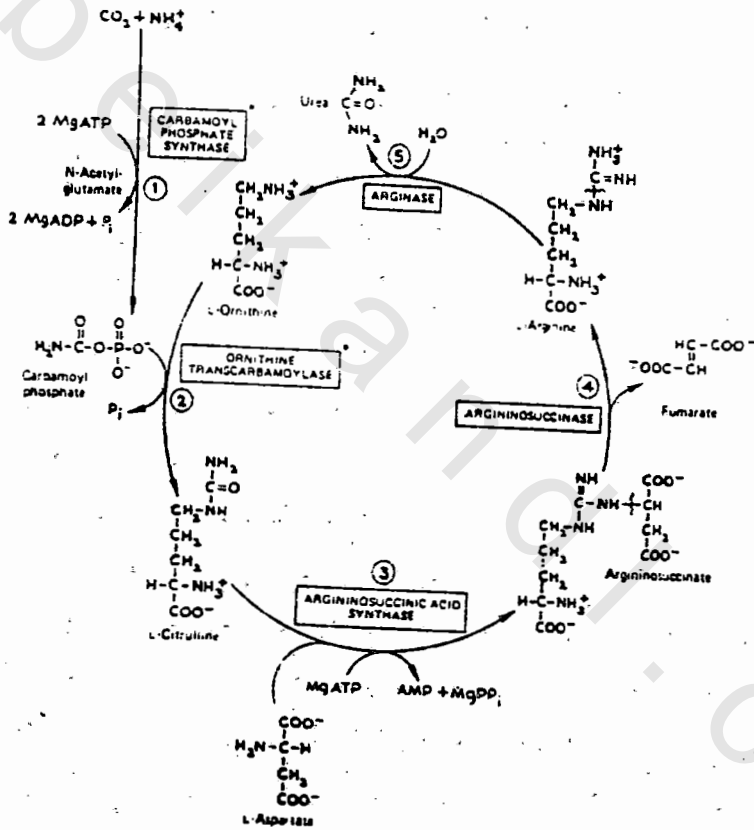
#### Catabolism of Amino Acid Nitrogen

تعتبر اليوريا بمثابة الناتج النهائى الرئيسى لمسارات هدم نتروجين الأحماض الأمينية وبالتالي البروتين وتتم عملية تكوين اليوريا من خلال دورة تعرف باسم دورة اليوريا urea cycle . وتتم تفاعلات هذه الدورة فى الكبد أساسا .

#### دورة اليوريا Urea cycle:

يتم تخليق اليوريا بواسطة مجموعة تفاعلات موصحة بالشكل رقم ١١-٤ ويتضح من الشكل أن النتروجين الأمينى يتم تهدمه الى يوريا بواسطة التفاعلات التالية:

١- ترتبط الأمونيا المزالة من الأحماض الأمينية مع  $CO_2$  فى وجود ATP ويتكون نتيجة لذلك مركب كربامويل فوسفات carbamoyl phosphate وينتج فوسفات غير عضوية  $P_i$  ، ويحفز هذا التفاعل بواسطة أنزيم carbamoyl phosphate synthase ويعتقد بضرورة وجود حمض N-acetyl glutamic لى يتم هذا التفاعل بيد أن دوره غير معروف على وجه اليقين .



شكل ١١-٤: دورة اليوريا urea cycle

٢- يتفاعل فوسفات الكاربامويل مع الأورنيثين L-ornithine فيتكون مركب L-citruline ويحفز هذا التفاعل بواسطة أنزيم ornithine transcarbamoylase وينتج عن هذا التفاعل فوسفات غير عضوية  $\text{P}_i$ .



ب - حمض الريبونوكليك الناقل . Transfer RNA (t-RNA)

ج - حمض الريبونوكليك الريبوسومى . Ribosomal RNA (r-RNA)

وتتم عملية طباعة شفرة الحمض الأمينى الموجودة على شريط الـ DNA بحيث يتم طباعتها على m-RNA الذى يعمل كقالب template للشفرة ، وقد أكدت التجارب التى أجريت على بكتريا *Escherichia coli* عند اصابها بواسطة الفيروس المعروف باسم T<sub>2</sub> bacteriophage أنه بمجرد حدوث عملية اصابة infection البكتريا بالفيروس فإنه يتم وبسرعة فائقة تخليق m-RNA لم يكن موجودا قبل الاصابة حتى يتسنى للبكتريا تخليق بروتينات هذا الفيروس ، فى حين لم توجد أى زيادة فى كميات أى r-RNA أو t-RNA بعد الاصابة بالفيروس .

ولقد تم تنمية بكتريا *E. coli* فى بيئة تحتوى على نظائر ثقيلة (أى <sup>15</sup>N, <sup>13</sup>C) وتم اصابة البكتريا بالفيروس ثم نقلت البكتريا توالى بيئة تحتوى على نظائر خفيفة (<sup>14</sup>N, <sup>12</sup>C) وتم فصل النواتج التى تكونت قبل وبعد عملية الاصابة infection بواسطة طرق الطرد المركزى متدرجة الكثافة density gradient centrifugation وتبين أن هذه المكونات أشتملت على RNA جديد معلم بالنظير <sup>32</sup>P أو <sup>14</sup>C-uracil وبروتين جديد معلم بالـ <sup>35</sup>S ، ولقد أوضحت هذه التجارب مايلى:

١- لم يتم تخليق ريبوسومات ribosomes جديدة فى الخلية بعد حدوث الـ infection .

٢- تم تخليق RNA بعد عملية الـ infection ومعظم هذا الـ RNA المتكون وجد مرتبطا بالريبوسومات وأن هذا الـ RNA يتغير سريعا خلال نمو الفيروس .

٣- ظهور نظير الكبريت <sup>35</sup>S مع الريبوسومات يدل على تخليق بروتينات جديدة على الريبوسومات الموجودة أصلا بالخلية البكتيرية .

ولقد أدت هذه التجارب الى استنتاج مؤداه أن الريبوسومات ليست متخصصة من الوجهة التركيبية لتقوم بتخليق البروتين وانما يوجد هناك حامل رسالة وراثية لابد أن يكون موجودا لتقيام بهذا الدور . وتبين أن هذا المركب هو m-RNA ، ومن هنا أتضح دور الـ m-DNA فى عملية تخليق البروتين ، ولقد أوضحت الدراسات أن الـ m-RNA يكون متكاملا complementry من حيث تركيب القواعد مع الجزء من الـ DNA الذى يحمل شفرته بمعنى أن الجزء من الـ DNA الذى يحمل شفرة حمض أمينى ما يطبع هذه الشفرة وفقا لتكامل القواعد على الـ m-RNA ، ويوضح الشكل ١١-٥ جزءا من الشفرة الموجودة على الـ DNA وطباعتها على الـ m-RNA .

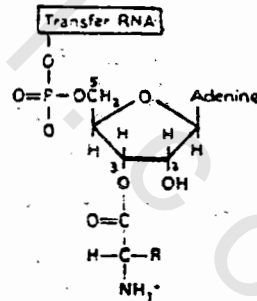
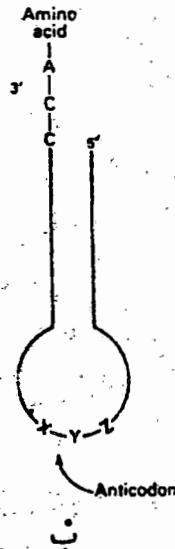




*Streptomyces* ويتأى فعله التثبيطي للتخليق الحيوى للبروتين من ارتباطه بقوة مع الحلزون المزدوج للـ DNA ومن ثم منع الـ DNA من أن يكون قالباً لتخليق الـ m-RNA. وكما سبق القول فإن الـ m-RNA يعمل كقالب لتخليق البروتين وقد يتساءل البعض كيف يعمل الـ m-RNA على توجيه الأحماض الأمينية لترتبط في الموضع الصحيح في تتابع سلسلة عديد الببتيد المزمع تخليقها؟

وان اجابة هذا السؤال لم تتضح جليا الا بعد أن تتأكد أن الـ transfer- RNA (t-RNA) يعمل كموفق adaptor في عملية تخليق البروتين حيث يحتوى الـ t-RNA على طرف يتصل بحامض أميني أما الطرف الآخر فهو مختص للتعرف على الحامض الأميني أى recognition site (شكل ١١-٦).

والحمض الأميني يتم استرته لمجموعة الهيدروكسيل على ذرة كربون ٣ للأدينوزين الطرفي للـ t-RNA ويسمى الـ t-RNA المرتبط بالحمض الأميني باسم aminoacyl t-RNA أو t-RNA المشحون charged حيث أن الـ t-RNA بدون الحمض الأميني يكون غير مشحون (شكل ١١-٧)



شكل ١١-٧: أ - اتصال الحمض الأميني بجزء الـ t-RNA.

ب - شكل يوضح aminoacyl-t-RNA واتصال الحمض الأميني به ومنطقة anticodon والتي تعمل بمثابة منطقة التعرف في القالب.

### الشفرة الوراثية للأحماض الأمينية Amino acids code:

أوضحت الدراسات أن الشفرة الوراثية للأحماض الأمينية هي عبارة عن علاقة بين تتابع القواعد النتروجينية على DNA (أو m-RNA كقالب) وبين تتابع الأحماض الأمينية في البروتين.

وعلى ضوء دراسات عديدة لكل من Crick and Brenner وآخرين أمكن في عام

١٩٦١ التوصل إلى المعلومات التالية بشأن الشفرة الوراثية للأحماض الأمينية:

١- أن شفرة الحمض الأميني الواحد تتكون من تتابع لثلاث قواعد معينة ويسمى هذا التتابع بالكودون Codon.

٢- لا يوجد تداخل بين الشفرة الوراثية non-overlapping للأحماض الأمينية.

٣- لما كانت الشفرة ثلاثية فإن عدد احتمالات الشفرة (الـ DNA يحتوى على ٤ قواعد) يكون مساويا  $4 \times 4 \times 4 = 64$  ، لما كان عدد الأحماض الأمينية التي تدخل في تركيب البروتين ٢٠ حمض أميني فإن ذلك يعنى وجود أكثر من شفرة لنفس الحمض الأميني الواحد ويستنتى من هذه القاعدة الحمض الأميني تربتوفان والحمض الأميني ميثيونين حيث أن لكل منهما شفرة ثلاثية واحدة. ويمكن القول بأن الأربعة والسنتين كودونا codon السابق ذكرها تقسم إلى قسمين واحد وستون كودون تعمل كشفرة ثلاثية لأحماض أمينية معينة في حين يتضمن القسم الثانى ثلاثة كودونات تعمل لانتهاء termination السلسلة الببتيدية.

وكما سبق القول فإنه توجد أكثر من شفرة للحمض الأميني الواحد وتسمى الشفرات

المختلفة لنفس الحمض الأميني بأسم synonymous وهي لحمض الهستيدين مثلا CAU and CAC.

ولكن يجب ملاحظة أن هذه الشفرة لذات الحمض لا تتكرر عشوائيا haphazardly وإنما

يتم تكرارها على أسس ثابتة كما تتضح من الجدول رقم ١١-١، فعلى سبيل المثال الأحماض

الأمينية في مجموعة يكون لها الكودونات GUU, GUC, GUA and GUG.

### ميكانيكية التخليق الحيوى للبروتين Mechanism of protein biosynthesis

تبين لنا مما سبق أن إنتاج الأحماض الأمينية في بروتين ما يتحدد بتتابع الكودونات

codons الموجودة بالـ m-RNA كما يتم قراءتها بواسطة جزيئات t-RNA . ولقد أوضحنا

كيف تتم عملية طباعة الشفرة الموجودة على الـ DNA لتنتقل إلى m-RNA وتتأى بعد عملية

الشفرة عملية ترجمتها translation ، وهذه العملية تعد أكثر تعقيدا من عملية الطباعة إذ أنها



تحتاج الى أكثر من مائة نوع من الجزيئات الكبيرة macromolecules لكي تتم، فعلى سبيل المثال تتطلب عملية الترجمة وجود جزيئات t-RNA، أنزيمات منشطة activating enzymes ومواد ذائبة و m-RNA بالإضافة الى الريبوسومات ribosomes.

جدول ١١-١: الشفرة الوراثية للأحماض الأمينية.

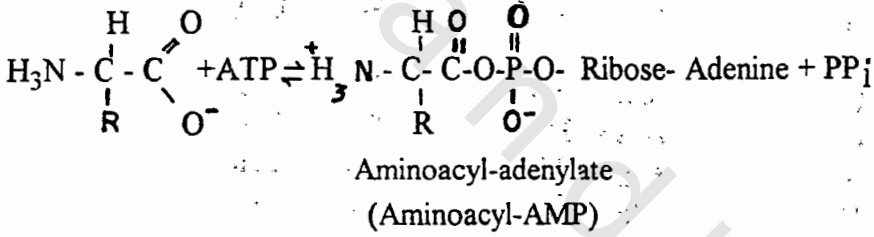
الموضع الثالث (r')	الموضع الثاني				الموضع الأول (الطرف د')	
	G	A	C	U		
U	Cys	Tyr		Ser	Phe	U
C	Cys	Tyr		Ser	Phe	
A	Stop	Stop		Ser	Leu	
G	Trp	Stop		Ser	Leu	
U	Arg	His		Pro	Leu	C
C	Arg	His		Pro	Leu	
A	Arg	Gln		Pro	Leu	
G	Arg	Gln		Pro	Leu	
U	Ser	Asn		Thr	Ile	A
C	Ser	Asn		Thr	Ile	
A	Arg	Lys		Thr	Ile	
G	Arg	Lys		Thr	Met	
U	Gly	Asp		Ala	Val	G
C	Gly	Asp		Ala	Val	
A	Gly	Glu		Ala	Val	
G	Gly	Glu		Ala	Val	

أولاً : تنشيط الحمض الأميني وربطة بالـ t-RNA:

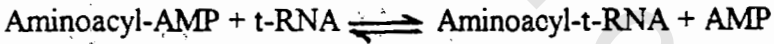
١- يرتبط الـ m-RNA بالريبوسومات في وجود t-RNA الناقل للحمض الأميني المنشط، ويتم عملية ربط الحمض الأميني بالـ t-RNA عن طريق تحفيز انزيمات synthetases ويتم عملية تنشيط الحمض الأميني عن طريق تكوين مركبات وسطية نشطة عبارة عن أستر الحمض الأميني والذي فيه ترتبط مجموعة الكربوكسيل للحمض الأميني بالمجموعة الهيدروكسيلية على

ذرة كربون ٢ أو ٣ لسكر الرايبوز في الطرف ٣ لكـ t-RNA ، ومجموعة aminoacyl المتكونة نتيجة لهذا التفاعل يمكنها الانتقال سريعا بين موضعى المجموعتى الهيدروكسيل فى ذرتى كربون ٢ ، ٣ .

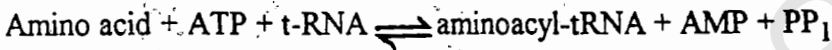
ويعتبر ارتباط الحمض الأميني بالـ t-RNA هاما ليس فقط لأنه ينشط المجموعة الكربوكسيلية ومن ثم يكون من السهل عليها تكوين ببتيد ، ولكن أيضا لأن الأحماض الأمينية بمفردها لا يكون فى مقدورها التعرف على الـ codons الموجودة بالـ m-RNA ، وتتم عملية نقل الأحماض الأمينية الى الريبوسومات (أماكن تخليق البروتين بسيتوبلازم الخلية) بواسطة t-RNAs متخصصة والتي يكون فى مقدورها التعرف على الشفرة الموجودة على m-RNA ، ويتم تنشيط الحمض الأميني وربطه بالـ t-RNA بفعل تحفيز أنزيمات متخصصة تعرف بالـ aminoacyl-t-RNA synthetases ، وتسمى بالانزيمات المنشطة activating enzymes وتتم عملية التنشيط وفقا للتفاعل التالى :



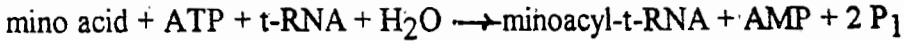
والخطوة التالية هى نقل مجموعة aminoacyl لكـ aminoacyl-AMP الى جزء t-RNA لتكوين aminoacyl t-RNA كما يلى :



ومجموع عمليات التنشيط والنقل يكون كما يلى :



وقيمة  $G^0$  لهذا التفاعل قريبة من الصفر لأن الطاقة الحرة لعملية التحليل المائى لرابطة الأستر بمركب aminoacyl-t-RNA تماثل نظيرتها لمجموعة الفوسفات الطرفية فى الـ ATP لذلك فان التفاعل يحدث بفعل الطاقة المتولدة من التحليل المائى للبيروفوسفات ومن ثم تكون محصلة التفاعلات الثلاثة كما يلى :



ومن ثم فإنه يتم استهلاك رابطتي فوسفات غنييتين في الطاقة لتخليق جزيء من الـ aminoacyl-t-RNA بحيث تستخدم إحدى هاتين الرابطتين في تكوين رابطة الأستر للـ aminoacyl-t-RNA بينما تستخدم الرابطة الثانية في دفع التفاعل الى الأمام. وتجدد الإشارة الى أن عمليتي التنشيط والنقل السابقتين تحفزان بنفس الـ aminoacyl-t-RNA synthetase بالنسبة لذات الحامض الأميني.

ثانياً: عملية الترجمة وتخليق البروتين :

١- بعد أن يتم ربط t-RNA الأول بالـ m-RNA (على الكودون X) فإن جزيئنا آخر من t-RNA يحمل الحمض الأميني رقم ٢ يربط بالكودون Y المجاور (يوجد t-RNA لكل حمض أميني).

٢- يتم ربط الحمض الأميني الأول بالحمض الأميني الثاني عن طريق رابطة ببتيدية بحيث يتم تخليق الببتيد في الاتجاه من المجموعة الأمينية الى المجموعة الكربوكسيلية بحيث يتم إضافة الأحماض الأمينية المتعاقبة الى النهاية الكربوكسيلية لسلسلة الببتيد المتكونة.

٣- بعد تكوين الروابط الببتيدية يتحرر t-RNA الأول وتتحرك الريبوسومات على طول خيط الـ m-RNA مما يهيء الفرصة لظهور الكودون التالي (Z) والذي يكون مستعداً لتارتباط بالـ t-RNA الحامل للحمض الأميني الثالث في تتابع سلسلة الببتيد (البولي ببتيد) المراد تخليقها.

٤- تتكرر الخطوات ٢، ٣، ٤ بالنسبة للأحماض الأمينية المتعاقبة في سلسلة الببتيد مما يؤدي الى تكون جزيئات بروتين في آن واحد على نفس الـ m-RNA وذلك عن طريق تحرك الريبوسومات على فترات منتظمة على طول خيط الـ m-RNA. وخطوات عمليتي الترجمة وتخليق البروتين موضحة بالشكل رقم ١١-٨ على ريبوسوم واحد أو عدد من الريبوسومات المتحدة (تسمى بوليسوم polysome).



## المراجع

- 1- Niederman, R.A. "ed." (1976). Benchmark Paper in Microbiology V. 10 Molecular biology and protein synthesis. Dowden, Hutchinson and Ross Inc., Stoudsburg, Pennsylvania.
- 2- Plummer, D.T. (1978). An introduction to practical biochemistry. Mc Graw Hill Book Company (UK), Limited, London.
- 3- Rodwell, V.W. (1985). Catabolism of amino acid nitrogen. Catabolism of the carbon skeletons amino acids. Conversion of amino acids to specialized products in: Martin, D.W.; Mayes, P.A.; Rodwell, V.W. and Granner, D.K. Harper's Review of Biochemistry. Lange Medical Publications, Los Altose, California, USA.
- 4- Stryer, L. (1981). Biochemistry W.H. Freeman and Company, San Francisco, USA.